

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA
COM PLANOS DE MEDIÇÃO DEFICIENTES

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

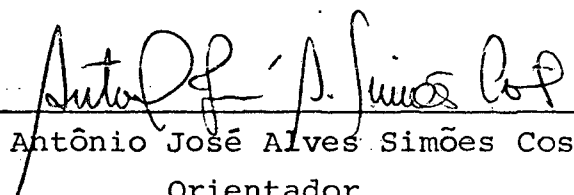
ELIZABETH ALFAYA DOS SANTOS

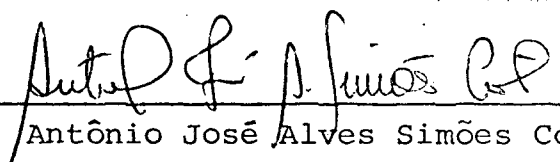
FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO 1985

ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA
COM PLANOS DE MEDIÇÃO DEFICIENTES

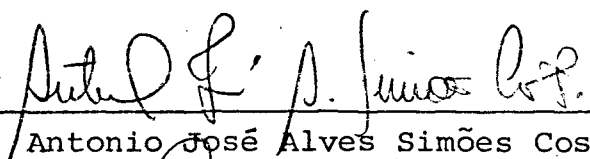
ELIZABETH ALFAYA DOS SANTOS

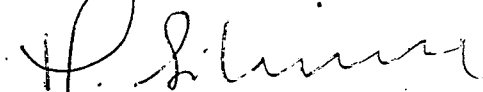
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA, ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA
EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO

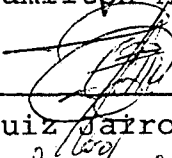

Prof. Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D.
Orientador

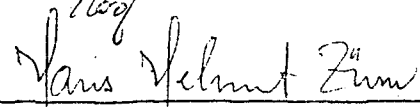

Prof. Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA


Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.


Prof. Hamilton Medeiros Silveira, D.Et.


Prof. Luiz Sairo Branco Machado, Dr. Ing.


Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

Ao meu Pai, Osvaldo Alfaya

A meu filho, João Vicente

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Professor Antônio José Alves Simões Costa pela dedicação e inestimável ajuda prestada ao longo deste trabalho.

Ao Valdecir em aos meus pais pelo apoio e incentivo recebidos.

À todos os professores colegas e funcionários do centro tecnológico que, de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

As amigas Fátima Cabreira e Mirtes Vieira pelo constante incentivo.

Agradeço à Marlei e José Carlos pela datilografia e desenhos realizados neste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao CNPq pelo apoio técnico e financeiro.

S U M Á R I O

RESUMO	VIII
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	
1.1 - O Problema da Observabilidade na Estimação de Estados em Sistemas de Potência	01
1.2 - Revisão Bibliográfica	03
1.3 - Contribuições e Organização deste Trabalho	05
1.3.1 - Contribuições do Trabalho	05
1.3.2 - Organização do Trabalho	06
CAPÍTULO II - OBSERVABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA: DEFINIÇÕES, CONDIÇÕES E UM ALGORITMO PARA A DETERMINAÇÃO, DA OBSERVABILIDADE TOPOLO GICA	
2.1 - Introdução	08
2.2 - Formulação do Problema de Observabilidade	08
2.3 - Observabilidade Topológica	13
2.4 - Um Algoritmo para a Determinação de Observabilidade ..	22
2.4.1 - Fundamentação: Descrição Suscinta do Método para Teste da Observabilidade	22
2.4.2 - Implementação do Algoritmo para Teste da Obser vabilidade	26

2.5 - Modificações Introduzidas no Algoritmo para a <u>Determi</u> nação da Observabilidade	29
2.6 - Considerações Finais	30

CAPÍTULO III - EXPANSÃO DE SUBSISTEMAS OBSERVÁVEIS

3.1 - Introdução	32
3.2 - Formulação do Problema	33
3.3 - Método para a Expansão de Subsistemas Observáveis	36
3.4 - Implementação do Método Proposto para Expansão de <u>Sub</u> sistemas Observáveis	41
3.4.1 - Descrição Geral do Programa Principal EXTINT .	41
3.4.2 - Rotinas utilizadas para o Processamento das <u>Me</u> didas Externas de Injeção	45
3.4.3 - Rotinas utilizadas para o Processamento da <u>Me</u> didas Internas de Injeção	48
3.5 - Considerações Finais	50

CAPÍTULO IV - ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS NÃO-OB SERVÁVEIS [6]

4.1 - Introdução	52
4.2 - Fundamentação Teórica [6]	52
4.3 - Método para Estimar os Estados de Sistemas Não- <u>Observá</u> veis [6]	57
4.4 - Considerações Finais	60

CAPÍTULO V - RESULTADOS NUMÉRICOS

5.1 - Introdução	61
5.2 - Sistemas-Teste Utilizados	62
5.3 - Resultados Obtidos	63
5.3.1 - Exemplo 1: Sistema de 14 Barras (Sistema A) ..	63
5.3.2 - Exemplo 2: Sistema de 30 Barras (Sistema B) ..	65
5.3.3 - Exemplo 3: Sistema de 48 Barras (Sistema C) ..	66
5.3.4 - Tempo de Execução	67
5.4 - Verificação dos Resultados Usando Estimacão de Estado.	68
5.5 - Consideracões Gerais sobre os Resultados Obtidos	69

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

6.1 - Conclusões	70
6.2 - Sugestões para Futuros Trabalhos	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICE I	75
APÊNDICE II	83

R E S U M O

Este trabalho está voltado à investigação de casos em que a utilização de um plano de medição deficiente não permite que os estados de um sistema de potência possam ser estimados. Isto é, enfoca-se o problema da não-observabilidade de um sistema de potência com respeito a um dado plano de medição.

Revê-se a teoria da observabilidade e um algoritmo anteriormente proposto na literatura é apresentado e modificado de forma a reduzir o tempo de processamento, melhorando assim sua eficiência computacional.

Também é proposto um algoritmo combinatório para que, com a ajuda de pseudomedidas de fluxo, se possa expandir um determinado componente observável que contenha uma barra especificada.

Os resultados foram verificados utilizando-se um programa de estimação de estados, segundo uma técnica de tratamento de sistemas não-observáveis sugerida na literatura.

Os testes para avaliação do método de expansão de um subsistema observável proposto foram realizados utilizando-se os sistemas-teste de 14 e 30 barras do IEEE e uma rede de 48 barras que é parte do sistema interligado do Sul do Brasil.

A B S T R A C T

This work investigates those cases in which the use of a deficient meter configuration prevents the estimation of the states of a power system. In other words, attention is focused on the problem of unobservability of a power system with respect to a given meter configuration.

The observability theory is reviewed and a previously proposed algorithm for observability determination is presented. Some modifications are introduced in that algorithm in order to reduce the execution time, thereby improving its computational efficiency.

A combinatorial algorithm to enlarge an observable component which contains an arbitrarily chosen bus is also proposed. The expansion of the given component relies on the use of some power flow pseudomeasurements.

The results of the component expansion technique are verified by performing state estimations. To estimate the states of a given observable part of an unobservable system, a method previously suggested in the literature has been used.

The 14-bus and the 30-bus IEEE test systems and a 48-bus network which is part of the Southern Brazil interconnected system have been used to evaluate the proposed techniques.

C A P Í T U L O I

INTRODUÇÃO

1.1 - O Problema da Observabilidade na Estimação de Estados em Sistemas de Potência

O maior e mais caro sistema construído pelo homem é o sistema de energia elétrica. Os problemas neste sistema apresentam-se desde os mais simples até os mais complexos, tornando sua solução em um desafio para todo o universo de pessoas ligadas a pesquisa desta natureza. A utilização da energia elétrica tem crescido na nossa sociedade fazendo que a dependência se torne cada vez maior e exigindo que o fornecimento desta energia seja econômico e seguro.

Este trabalho foi uma tentativa de contribuir para que o sistema elétrico atenda a sociedade de uma maneira mais confiável e segura.

Uma função da estimação dos estados em um sistema de potência é a filtragem dos valores analógicos telemedidos, garantindo que um conjunto de medidas a serem processadas pelo estimador seja isento de erros grosseiros. O processamento do conjunto de medidas (obtidas diretamente da rede por um sistema de aquisição de dados) pelo estimador de estados é a primeira etapa para que se tenha possibilidade de avaliar em tempo real a segurança da operação do sistema de potência.

A estimação de estados de um sistema de potência é o processo matemático no qual se determina os módulos das tensões

e os ângulos de fase das barras do sistema considerado, a partir de telemidições (módulo de tensão, fluxo de potência real e reativa, injeção de potência real e reativa) [5].

Se, com as telemidições das quantidades acima mencionadas, é possível se determinar os módulos e ângulos das tensões do sistema completo, este é considerado observável [5].

O objetivo da análise da observabilidade com respeito a um dado plano de medição em um sistema de potência é precisamente determinar se as medidas consideradas são suficientes para estimar o vetor de estados das barras de todo o sistema. Em caso afirmativo a estimação prossegue, em caso contrário, para que o programa de estimação continue sendo processado, pseudomediadas podem ser adicionadas para tornar o sistema globalmente observável. A precisão dos estados vai em grande parte depender da precisão das pseudomediadas introduzidas, sendo portanto de menor confiabilidade.

Outra alternativa consiste na estimação de estados de cada subsistema observável, desde que existam medidas suficientes para estimar os estados.

Um outro procedimento, que é o apresentado neste trabalho, é a expansão de um componente observável em que se tem interesse.

Na etapa de planejamento os testes de observabilidade são também importantes, para indicar onde e como reforçar os planos de medição, a fim de se obter a estimação dos estados em todas as barras do sistema.

Uma classe de métodos utilizados para o estudo do problema da observabilidade são aqueles baseados em técnicas combinatórias, que não usam cálculos em ponto flutuante. Estes métodos extraem conclusões a respeito da observabilidade a partir da topologia do sistema de potência e do plano de medição utilizado. A vantagem na sua utilização é a maior velocidade de pro

cessamento e a possibilidade de se obter, em caso de não-observabilidade, indicações a respeito da parte do sistema que é observável e de quais medidas devem ser adicionadas para tornar o sistema observável.

A maioria dos métodos que usam cálculos com ponto flutuante, anteriormente propostos para a análise de observabilidade, consomem tempo considerável de processamento. Estes métodos, em geral, também não indicam a causa do problema da não-observabilidade e como remediá-lo [10].

1.2 - Revisão Bibliográfica

Uma maior atenção para os estudos de observabilidade em sistemas de potência foi dada a partir de 1973. Uma contribuição para o estudo de observabilidade foi dada por Clements e Wollenberg, que investigaram as condições mínimas para observabilidade tendo por base a topologia da rede e as leis de Kirchhoff [1]. O conceito de ilhas não-observáveis foi também introduzido em [1].

Na pesquisa realizada por Allemong, Irisarri e Sasson [2] é mostrado através de contra-exemplos, que o algoritmo proposto na referência [1] é conservativo, isto é, pode, declarar um sistema de potência como sendo não-observável quando na realidade ele é observável. Os autores propuseram então um algoritmo com base em geração de árvores na tentativa de encontrar na rede uma árvore observável, isto é, uma árvore para a qual existe uma correspondência entre cada ramo e uma medida.

Na referência [3] Krumpholz, Clements e Davis apresentam importantes contribuições para teoria da observabilidade

de sistemas de potência, sendo introduzidos os conceitos de observabilidade algébrica, numérica e topológica. Através de teoremas, os autores demonstram que uma condição necessária para uma rede ser observável é a existência de uma árvore geradora observável. A teoria desenvolvida em [3] é fundamentada num modelo linearizado de medição que usa o desacoplamento $P - \delta$ e $Q - V$.

Na referência [4] a análise da observabilidade topológica baseia-se na busca direta de uma árvore geradora observável num grafo de medição Z . Este grafo de medição é construído a partir do grafo da rede e do plano de medição M . Para a construção do grafo de medição Z são definidas propriedades que relacionam medida de fluxo e injeção às respectivas arestas de fluxo e arestas de injeção. O algoritmo proposto em [4] inicialmente processa medidas de fluxo e, se a árvore geradora não for encontrada, são processadas, uma de cada vez, as medidas de injeções, caso a árvore geradora não for encontrada, o algoritmo informa a máxima floresta observável F obtida.

A referência [5] enfoca o problema da estimação de estados em um sistema de potência previamente identificado como não-observável. Todas as medidas de tensão nas barras são consideradas equivalentes a medidas de fluxo reativo em uma susceptância shunt unitária ligando as respectivas barras com a referência.

Para cada plano de medição em que não existe paridade entre medidas ativas e reativas, o algoritmo de observabilidade deve ser executado duas vezes, uma para o caso $P - \delta$ e outra para o caso $Q - V$. O método proposto não considera medidas de injeção em barras de fronteira.

A referência [9] considera o caso de sistemas não-observáveis devido a utilização de planos de medição deficientes.

tes e apresenta um método para a seleção de pseudomedidas de injeção nas barras, baseados em valores previstos, para tornar o sistema observável. O acréscimo de pseudomedidas, ou adiciona um ramo numa floresta máxima F , ou identifica um subsistema observável contendo um conjunto mínimo de medidas dependentes. O acréscimo de pseudomedidas pode prosseguir até a formação da máxima floresta F ou a formação de uma árvore geradora observável, tornando todo o sistema observável.

A referência [8] se baseia no conceito de classe de equivalência. Se a rede tem uma única classe de equivalência isto indica que existe uma árvore geradora observável e a rede é observável. Cada injeção é associada a um ramo de uma lista formando uma combinação. Se todas as combinações possíveis forem testadas a rede é declarada não-observável.

A referência [6] considera um sistema de potência não-observável com respeito a um plano de medição e apresenta um método para estimar os estados das partes observáveis deste sistema.

1.3 - Contribuições e Organização deste Trabalho

1.3.1 - Contribuições do trabalho

No decorrer deste trabalho algumas contribuições foram dadas para a investigação de casos em que um sistema é não-observável devido a um plano de medição deficiente.

Inicialmente introduziram-se modificações no algo

ritmo que testa a observabilidade proposto em [4], com o objetivo de aumentar sua eficiência computacional.

Pesquisou-se a proposição de um método heurístico para, com a ajuda de pseudomedidas de fluxo, expandir um subsistema (ilha) observável.

Houve também a possibilidade de que se ganhasse experiência com a utilização da técnica proposta em [6] para estimar os estados em sistemas de potência não-observáveis.

Os testes das técnicas propostas, usando estimador de estados, foram realizados como o auxílio de três sistemas-teste: os sistemas de 14 e 30 barras do IEEE, e um sistema de 48 barras que é parte do sistema interligado do Sul do Brasil.

1.3.2 - Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis Capítulos:

O Capítulo II expõe o problema da observabilidade de um sistema de potência, sendo definidas condições para a observabilidade. Um método é apresentado para a verificação da observabilidade topológica de um sistema de potência.

No Capítulo III comenta-se sobre as alternativas para se estimar os estados de um sistema de potência não-observável com respeito a um plano de medição. Entre estas alternativas está a expansão de um determinado componente observável, que é adotada neste trabalho.

É proposto então um algoritmo heurístico para a expansão do componente observável em questão.

A técnica proposta na referência [6] para estimar os estados de um subsistema observável é revista no Capítulo IV.

Os resultados da aplicação da técnica desenvolvida no Capítulo III aos três sistemas-teste são apresentados (e seus resultados confirmados através do uso de um programa de estimação de estados) no Capítulo V. Finalmente no Capítulo VI apresentam-se as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

C A P Í T U L O I I

OBSERVABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA: DEFINIÇÕES, CONDIÇÕES E UM ALGORITMO PARA A DETERMINAÇÃO DA OBSERVABILIDADE TOPOLÓGICA

2.1 - Introdução

Este Capítulo tem como objetivos apresentar uma formulação para o problema de observabilidade de um sistema de potência e, discutir a utilização de um algoritmo para a verificação da observabilidade em um sistema cuja topologia e plano de medição são dados.

A organização do Capítulo é a seguinte. A seção 2.2 enfatiza a importância do estudo da observabilidade para a estimação de estados em sistema de potência.

Refere-se também à equivalência entre a observabilidade de um sistema e a determinação do posto da matriz Jacobiana. A seção 2.3 mostra que a investigação da observabilidade topológica é equivalente à busca de uma árvore geradora observável no grafo de medição. Em seguida, na seção 2.4, apresenta-se um método para a verificação da observabilidade topológica e fornece alguns detalhes de sua implementação. A seção 2.5 apresenta uma modificação no algoritmo de observabilidade com o objetivo de melhorar sua eficiência computacional. Finalmente, na seção 2.6, são feitas considerações finais sobre os tópicos abordados no capítulo.

2.2 - Formulação do Problema de Observabilidade

Um sistema de potência é observável no sentido da

estimação estática de estados com respeito a um dado conjunto de medidas (plano de medição) M , se os módulos e ângulos das tensões em todas as barras do sistema podem ser determinados através do processamento das medidas em M por um estimador de estados. Caso, as medidas consideradas não sejam suficientes para estimar os estados do sistema, este é dito *não-observável* em relação a M .

Considerações a respeito da observabilidade são importantes, tanto na etapa de planejamento do plano de medição, quanto na operação em tempo real do estimador de estados.

Os estudos para projeto do plano de medição são realizados, com o objetivo de propor um plano de localização de medidores que garanta a estimação dos estados em todas as barras do sistema, mesmo na hipótese de ocorrência de falhas no sistema de telemedição ou saída de linhas.

Antes de ser rodado o programa de estimação dos estados de um sistema em tempo real, deve-se realizar o estudo de observabilidade. O objetivo deste estudo é determinar se as medidas consideradas em determinado instante são suficientes para estimar os estados de todo o sistema. Se estas medidas atenderem às condições acima, a estimação prossegue; em caso contrário, o sistema é considerado não-observável. Neste último caso, portanto, o estimador não será capaz de estimar os estados da rede completa com as medidas disponíveis.

A questão de observabilidade se relaciona com o posto da matriz Jacobiana $H(x)$ conforme será visto na análise a seguir.

Seja um vetor y de medidas do sistema, o qual pode ser composto de : módulos de tensão, injeções de potência ativa e reativa nas barras, e fluxos de potência ativa e reativa nas li

nhas. Estas medidas possuem erros inerentes ao próprio sistema de medição, que no seu conjunto são representados pelo vetor \underline{n} . O conjunto de medidas se relaciona com as variáveis de estado e os erros de medição por meio de uma função não-linear $\underline{h}(\cdot)$, conforme a equação [4]:

$$\underline{y} = \underline{h}(\underline{x}) + \underline{n} \quad (2.1)$$

$$E \{ \underline{n} \underline{n}^t \} = R \quad (2.2)$$

Onde:

N : Número de Barras da Rede;

\underline{y} : vetor de medidas ($m \times 1$);

$\underline{h}(\cdot)$: vetor das funções não-lineares que relaciona as quantidades medidas e as variáveis de estado ($m \times 1$);

\underline{x} : vetor de variáveis de estado ($n \times 1$), onde $n = 2N - 1$ representa o número de variáveis de estado;

\underline{n} : vetor dos erros de medição ($m \times 1$);

$E \{ \cdot \}$: valor esperado;

R : matriz de covariância dos erros de medição ($m \times m$).

A matriz de covariância R se reduz a uma matriz diagonal devido à consideração de que os erros de medição são independentes.

O vetor de medidas \underline{y} é obtido de um sistema de medição que, através de medidores analógicos e um sistema de telemetria, varre os pontos de medição e reúne estas informações em um centro processador.

O método mais usado para estimar os estados das barras de uma rede elétrica é o método dos mínimos quadrados ponderados [4]. Este método consiste em obter a estimativa ótima $\hat{\underline{x}}$ do vetor de estado, dada pelo vetor \underline{x} tal que a soma dos quadrados dos resíduos de estimação

$$J(\hat{\underline{x}}) = [\underline{y} - \underline{h}(\hat{\underline{x}})]^T R^{-1} [\underline{y} - \underline{h}(\hat{\underline{x}})] \quad (2.3)$$

seja mínima.

Para contornar o problema da não-linearidade de $\underline{h}(\underline{x})$, a equação (2.1) é linearizada em torno do vetor de estados corrente, \underline{x}_k . Em consequência, a função custo a ser minimizada torna-se:

$$\tilde{J}(\Delta \underline{x}) = [\Delta \underline{y} - H(\underline{x}_k) \Delta \underline{x}]^T R^{-1} [\Delta \underline{y} - H(\underline{x}_k) \Delta \underline{x}] \quad (2.4)$$

Onde:

$$\Delta \underline{x} \triangleq \underline{x} - \underline{x}_k$$

: vetor de correções para o vetor atual de estado \underline{x}_k ($n \times 1$);

$\underline{\Delta y} \triangleq \underline{y} - \underline{h}(\underline{x}_k)$: vetor incremental
de medidas ($m \times 1$);

$H(\underline{x}_k) \triangleq \left. \frac{\partial \underline{h}(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x} = \underline{x}_k}$: matriz Jacobiana.

A solução final do problema de estimação de esta
dos é obtida através de um algoritmo iterativo dado por:

$$\underline{x}_{k+1} = \underline{x}_k + \underline{\Delta x} \quad (2.5)$$

onde \underline{x}_k é o vetor estimação de estado na iteração em que a li
nearização de $\underline{h}(\underline{x})$ é realizada.

A solução do problema de estimação de estados pe
lo método dos mínimos quadrados, para o caso em que se quer esti
mar n estados processando-se m medidas, $m \geq n$, é obtida atra
vés de um processo iterativo tal que, em cada iteração, a equação
(2.4) é resolvida (ver referência [7]).

A condição necessária e suficiente para a observa
bilidade é que a matriz ganho definida como:

$$G \triangleq H^T R^{-1} H \quad (2.6)$$

tenha posto igual ao número de estados, n . Sendo R uma matriz
diagonal não-singular, esta condição implica em que a matriz Jaco
biana deve ter posto igual a n (pag. 34 ref. [11]). Para isto,
há necessidade de se dispor de pelo menos um conjunto de n medi
das tais que as n linhas correspondentes da matriz Jacobiana se

Um sistema é definido como sendo *algebricamente observável* [3] com respeito a um conjunto de medidas se a matriz H possui posto igual a n , que é a dimensão do vetor de estados x .

Um sistema de potência é *numericamente observável* [4] na estimação dos estados com respeito a um dado conjunto de medidas M , se as estimativas dos módulos e ângulos das tensões das barras do sistema considerado podem ser obtidas a partir dos valores iniciais $|V| = 1.0$ pu e $\delta = 0$ radianos em todas as barras do sistema ("flat start").

Um sistema numericamente observável [3] é *algebricamente observável*, mas a recíproca pode não ser válida. Assim, a matriz H pode ter posto completo mas ser mal condicionada com respeito a certo ponto de operação, de modo que no curso da solução iterativa, surjam problemas numéricos e a estimativa final não é obtida. Pode também ocorrer que a condição inicial ($V = 1.0$ pu e $\delta = 0.0$), se encontre muito distante do valor do estado real do sistema. Como consequência não se obtém convergência e o sistema é dito numericamente não-observável [3].

Os métodos para testar a observabilidade pela determinação do posto da matriz utilizando cálculos em ponto flutuante, exigem um tempo de computação considerável e não indicam a causa do problema da não-observabilidade [4]. Desta forma é preferível investigar a observabilidade em termos da estrutura da matriz Jacobiana, isto é, do ponto de vista topológico.

2.3 - Observabilidade Topológica

Utilizando um modelo de medição linear desacoplado

Krumpholz, Clements e Davis [3] estabeleceram as condições para a observabilidade topológica de um sistema de potência com respeito a um dado plano de medição.

A observabilidade topológica deriva da condição de que a matriz Jacobiana deve ter posto completo (isto é, igual a n). Portanto, o número mínimo de medidas para estimar os estados do sistema é igual ao número n de estados do sistema considerado.

O modelo de medição linearizado utilizado em [3] faz uso do desacoplamento $P - \delta$ e $Q - V$. Este desacoplamento é baseado na observação de que as medidas de potência ativa (como injeções nas barras e fluxos nas linhas) possuem mais informações sobre o ângulo de tensão do que seu módulo, enquanto as medidas de potência reativa fornecem maiores informações sobre o valor da tensão do que o ângulo de tensão.

Um argumento relevante para o uso do desacoplamento no estudo da observabilidade é o de que os módulos das tensões podem ser medidos diretamente, enquanto os ângulos de tensão não são medidos.

O modelo de medição linear desacoplado utilizado por Krumpholz, Clements e Davis [3] está representado a seguir:

$$\begin{bmatrix} \underline{y}_P \\ \underline{y}_Q \\ \underline{y}_V \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} \underline{x}_\delta \\ \text{-----} \\ \underline{x}_V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{c} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{n}_P \\ \underline{n}_Q \\ \underline{n}_V \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

As matrizes e vetores que entram na composição da equação (2.7), juntamente com suas respectivas dimensões, são definidas a seguir.

- m_t : Número de medidas de fluxo de potência ativa;
 m_p : Número de medidas de injeção de potência ativa;
 m_u : Número de medidas de fluxo de potência reativa;
 m_q : Número de medidas de injeção de potência reativa;
 m_v : Número de medidas de módulo de tensão.

$$m_p \triangleq m_t + m_p$$

$$m_q \triangleq m_u + m_q$$

- ℓ : Número de linhas de transmissão.

$$\underline{y}_p \triangleq \begin{bmatrix} \underline{y}_t \\ \underline{y}_p \end{bmatrix}$$

- \underline{y}_t , \underline{y}_p : Vetores $m_t \times 1$ e $m_p \times 1$ de medidas de fluxo e medidas de injeção de potência ativa.

$$\underline{y}_q \triangleq \begin{bmatrix} \underline{y}_u \\ \underline{y}_q \end{bmatrix}$$

- \underline{y}_u , \underline{y}_q : Vetores $m_u \times 1$ e $m_q \times 1$ de medidas de fluxo e medidas de injeção de potência reativa.

- \underline{y}_v : Vetor $m_v \times 1$ de medidas de módulo de tensão.

$$H \triangleq \begin{bmatrix} H_{\delta} & 0 \\ 0 & H_V \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$H_{\delta} \triangleq M_P Y_B A_r^T \quad (2.9)$$

$$H_V \triangleq \begin{bmatrix} M_Q & Y_B & A_r^T - 2N_Q Y_S C^T \\ & & M_V \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Onde [3]:

- \underline{x}_{δ} : Vetor $(N-1) \times 1$ de ângulo de tensão da barra (o ângulo da barra de referência não é considerado);
- \underline{x}_V : vetor $N \times 1$ de módulo de tensão da barra;
- M_P : matriz de incidência medidas de potência ativa-linhas de transmissão [3] ($m_P \times \ell$);
- M_Q : matriz de incidência medidas de potência reativa-linhas de transmissão ($m_Q \times \ell$);
- M_V : matriz de incidência medidas de tensão -barras [3] ($m_V \times N$);
- A_r : matriz de incidência barras-linhas reduzida (não é considerada a barra de referência

$((N-1) \times \ell);$

Y_B : matriz diagonal real de admitância das li
nhas ($\ell \times \ell$);

Y_S : matriz diagonal real de admitância derivaç
ão das linhas ($2\ell \times 2\ell$);

C : matriz de incidência barra - elemento em
derivação para a terra $((N-1) \times 2\ell)$;

N_Q : matriz de incidência medidas de potência real
tiva elementos em derivação para a terra
 $(m_Q \times 2\ell)$;

\underline{x}_{V0} : vetor ($N \times 1$) com todos os seus elementos i
guais a 1.

$$\underline{c} = \underline{\Delta} \begin{bmatrix} N_Q & Y_S & C^T \end{bmatrix} \underline{x}_{V0}$$

\underline{n}_p : Vetor $m_p \times 1$ de erros de medição de medidas
de fluxo e injeção ativas;

\underline{n}_Q : vetor $m_Q \times 1$ de erros de medição de medidas
de fluxo e injeção reativas;

\underline{n}_V : vetor $m_V \times 1$ de erros de medição de módulo de
tensão.

As equações 2.9 e 2.10 são formadas por matrizes de incidência, com exceção das matrizes Y_B e Y_S , que são matrizes diagonais reais que não afetam a estrutura das matrizes H_δ e H_V , determinadas pela localização de medidores e pela topologia da rede. Os elementos das matrizes de incidência tem valores $-1, 0$ e 1 . Analisando a estrutura das matrizes H_δ e H_V , as seguintes observações são feitas [4]:

- a) As medidas de fluxo em uma linha de transmissão se relacionam com os módulos e os ângulos de tensão das barras terminais da linha considerada;
- b) Uma medida de injeção em uma barra inter-relaciona a tensão na barra medida com as tensões de todas as barras conectadas à barra medida;
- c) A medida de tensão de uma barra somente informa sobre a magnitude de tensão na barra em que a medida é realizada.

Ao se estudar a observabilidade topológica são muito úteis os conceitos de observabilidade $P - \delta$ e observabilidade $Q - V$ originados do desacoplamento $P - \delta / Q - V$ [4], [10].

Um sistema é $P - \delta$ observável com respeito a um conjunto de medidas M_P (formado por medidas de injeção e fluxo de potência ativa) se, dado que os módulos das tensões nas barras são conhecidos, os ângulos de tensão em todas as barras do sistema podem ser determinados através do processamento de medidas em M_P . Da mesma maneira, um sistema é $Q - V$ observável com respeito ao conjunto de medidas M_Q (formada por medidas de tensão e medidas de potência reativa de injeção e fluxo) se, supondo-se conhecidos os ângulos das tensões nas barras é possível determinar-se os módulos das tensões, em todas as barras processando-se as medidas em M_Q .

Um sistema de potência contendo N barras é $P - \delta$ algebricamente observável com respeito a um conjunto de medidas ativas se e somente se o posto da matriz H_δ da equação (2.9) é igual a $N - 1$. Da mesma forma, um sistema é $Q - V$ algebricamente observável com respeito a um dado conjunto de medidas reativas se e somente se o posto da matriz H_V (2.10) é igual a N [10], [3].

Enquanto que as magnitudes de tensão podem ser medidas, não é possível, por outro lado, medir-se os ângulos de tensão nas barras. Logo a observabilidade $P - \delta$ é em geral mais crítica que a observabilidade $Q - V$ [10].

Ocorrendo a não-paridade entre medidas do tipo ativo e medidas do tipo reativo, o problema de observabilidade $P - \delta$ e $Q - V$ devem ser analisados separadamente, já que as medidas de magnitude de tensão existentes não terão medidas ativas correspondentes.

Geralmente, os algoritmos combinatórios processam as medidas de fluxo e injeção, sendo as medidas de tensão consideradas equivalentes a medidas de fluxo reativo de uma susceptância unitária que liga a barra em que é feita a medida com a referência [5], [8].

Neste trabalho consideram-se as medidas de fluxo e injeção tomadas aos pares (ativo/reativo), com uma medida de tensão na barra de referência. Neste caso, conclusões sobre os casos $P - \delta$ e $Q - V$ podem ser obtidas a partir de uma única aplicação do algoritmo de observabilidade [4].

Para se introduzir o conceito de observabilidade topológica, deve-se definir inicialmente um grafo cujos elementos são equivalentes aos elementos do sistema real considerado, que é chamado *grafo da rede*. A observabilidade topológica é então expressa em termos do grafo da rede, o qual basicamente corresponde ao diagrama unifilar do sistema [10]. O grafo da rede é formado por vértices que correspondem às barras do sistema de potência, e por arestas correspondentes às linhas de transmissão.

Outra noção importante para a definição de observabilidade to

pológica é o da associação das medidas que formam o plano de medição às arestas do grafo da rede.

Uma medida z pertencente a um conjunto de medidas M pode ser associada a uma aresta a do grafo da rede se:

- 1 - z é uma medida de fluxo na linha de transmissão que corresponde à aresta ou
- 2 - z é uma medida de injeção em uma das barras terminais da linha correspondente à aresta a .

Uma árvore geradora do grafo da rede é uma árvore cujo conjunto de vértices é igual ao conjunto de barras do sistema considerado. Uma árvore geradora é observável com respeito ao plano de medição M se e somente se for possível associar uma medida z pertencente a M a cada um de seus ramos, sem que existam dois ramos associados à mesma medida [4].

Uma floresta F , do grafo da rede é um subgrafo que não forma circuitos. (Ressalta-se que o número de vértices de F pode ser menor que o número de vértices do grafo da rede).

Uma floresta F é observável com respeito a M se for possível definir uma associação de medidas em M com cada um dos ramos de F sem que existam dois ramos associados à mesma medida [4].

Com a consideração de que as medidas de fluxo e injeção são tomadas aos pares (ativo/reativo) o problema da observabilidade $P - \delta$ será investigada tendo por base as condições estabelecidas pelos seguintes teoremas:

Teorema 1

Se um sistema de potência é algebricamente observável

vel com respeito a um conjunto de medidas M , então existe uma árvore geradora no grafo da rede que é observável e cujos ramos são associados a medidas em M [3].

Teorema 2

Considere que existe uma árvore geradora observável no grafo da rede cujos ramos são associados a medidas em M . Caso o vetor formado pelas impedâncias - série das linhas de transmissão não se encontre sobre uma determinada superfície C de dimensão $(n - 1)$, o sistema é algebricamente observável com respeito às medidas " M " [3].

O teorema 1 afirma que a existência de uma árvore geradora observável é condição necessária para a observabilidade algébrica. O teorema 2, contudo, rigorosamente não fornece uma condição suficiente, já que afirma ser possível a existência de uma árvore geradora observável sem que o sistema seja algebricamente observável. Tal ocorrência deve-se a certas combinações dos valores das impedâncias das linhas de transmissão entre si de modo a reduzir o posto das matrizes H_δ (equação 2.9) e/ou H_V (equação 2.10). Na prática entretanto, é improvável a ocorrência deste fato. Isto quer dizer que a existência de uma árvore geradora observável, praticamente implica na observabilidade algébrica [3].

Pode-se portanto concluir, a partir dos teoremas acima, que a investigação da observabilidade algébrica consiste na busca de uma árvore geradora observável no grafo da rede. Para levar em conta o caráter topológico desta busca, introduz-se a de

finição a seguir.

Um sistema de potência é *topologicamente observável* com respeito a um plano de medição M se existir uma árvore geradora observável do grafo de rede do sistema com respeito a M .

2.4 - Um Algoritmo para a Determinação de Observabilidade

2.4.1 - Fundamentação e Descrição Sucinta do Método para Teste da Observabilidade

Em [4], o problema da observabilidade é formulado em termos do *grafo de medição* Z da rede elétrica correspondente ao grafo da rede e associado ao plano de medição M .

O método proposto em [4] e revisto nesta seção busca uma árvore geradora no *grafo de medição*, Z . Este grafo possui o mesmo número de vértices do grafo da rede, mas as arestas são determinadas pelo conjunto de medidas M .

As seguintes propriedades definem o grafo de medição Z :

- 1 - Os vértices de Z são os mesmos vértices do grafo da rede;
- 2 - Se o fluxo na linha $i - j$ é medido, então os vértices i e j são conectados em Z por uma aresta que será associada aquela medida de fluxo (aresta de fluxo).
- 3 - Se a injeção na barra i é medida, o vértice i

no grafo Z será conectado a cada um dos seus vértices adjacentes mediante arestas que serão associadas a medida de injeção (arestas de injeção).

A Figura 2.1 [4] ilustra o grafo da rede com um conjunto de medidas associadas (Figura 2.1.a) e o correspondente grafo de medição (Figura 2.1.b).

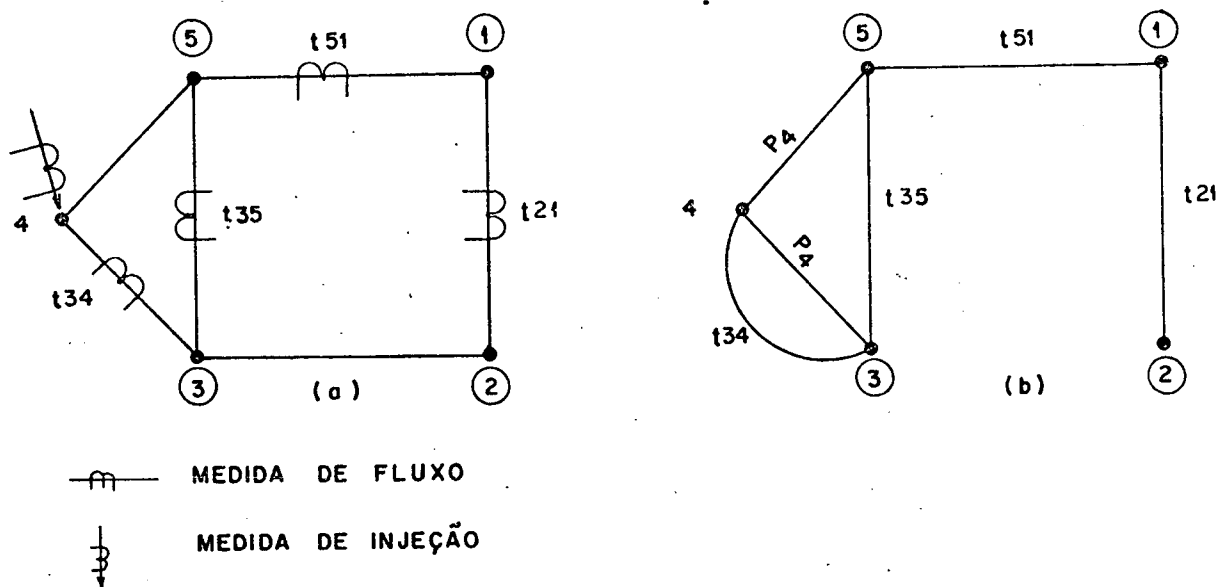


FIGURA 2.1 - Grafo da Rede e Grafo de Medidas.

a) Grafo da Rede e Medidas.

b) Grafo de Medição (Z).

Como já foi dito na seção 2.3, considerar-se-á apenas o caso em que as medidas em M são tomadas aos pares (ativo - reativo), com uma medida de tensão na barra de referência. Neste caso, a análise pode ser restrita ao problema $P - \delta$.

O grafo de medição contém, todas as possíveis arestas que podem ser associadas com as medidas em M . O problema da observabilidade topológica reduz-se assim à busca de uma árvore geradora do grafo de medição, árvore esta que sofre a restrição de *não poder conter dois ramos* que sejam associados à mesma medida. Uma árvore com estas características é claramente uma árvore geradora observável. Em [4] propõe-se o uso de um algoritmo de intersecção de matrôides para a busca desta árvore geradora observável no grafo de medição Z .

O algoritmo primeiramente processa as arestas de fluxo e as arestas de injeção separadamente. Inicialmente, considera-se apenas o subgrafo de Z formado por arestas de fluxo. Em seguida o algoritmo tenta encontrar uma floresta F neste subgrafo que seja máxima.

Se F for uma árvore geradora observável, conclui-se que o sistema é observável, sem necessidade de processamento das medidas de injeção. (O caso em que F é uma árvore geradora observável constitui-se portanto em problema trivial, de fácil solução). No caso mais geral, em que a árvore geradora formada, somente por arestas de fluxo, não é encontrada, torna-se necessário processamento da segunda parte do algoritmo. Nesta segunda etapa, são processadas arestas de injeção (as arestas de fluxo que não são ramos da floresta F não serão mais usadas, e aquelas que já estão em F aparecerão no final como ramos da árvore geradora observável, caso ela existir). Supondo que a árvore geradora observável,

vável exista, as arestas de injeção podem ser vistas como elos ligando os componentes da floresta formados por arestas de fluxo. Nesta segunda parte do algoritmo, as arestas de injeção são processadas uma de cada vez na tentativa de expandir a floresta F . Uma aresta de injeção j será imediatamente adicionada a F se:

- 1 - A aresta j não forma nenhum circuito com os ramos da floresta F existente, e
- 2 - Nenhuma aresta associada à mesma medida de injeção já está em F .

Caso alguma das duas condições acima não for satisfeita, a aresta j não é definitivamente excluída de consideração, podendo ainda ser posteriormente aproveitada. Para tanto, o algoritmo usa a aresta j (e outra aresta associada à mesma injeção que por acaso já esteja em F) na construção sistemática de um grafo bipartido auxiliar $G(X,Y)$, onde X é o conjunto de arestas de injeção já em F e Y o conjunto de arestas de injeção que não está em F . Este grafo bipartido será usado quando o processamento de todas as arestas de injeção não resultar em aumento no número de ramos de F . Neste caso, o uso do grafo bipartido auxiliar pode oferecer escolhas alternativas de arestas de injeção que poderão propiciar um aumento da floresta F .

Sempre que um novo ramo é adicionado a F o algoritmo verifica se F se tornou uma nova árvore geradora. Em caso negativo, as arestas de injeção são processadas novamente na tentativa

va de expandir a floresta F .

O algoritmo termina quando uma árvore observável é encontrada ou quando não é mais possível se aumentar a floresta F existente.

Sempre que existir uma árvore geradora observável, o algoritmo proposto em [4], será capaz de encontrá-la.

Uma propriedade importante do algoritmo é o fato de que, se uma árvore geradora observável não puder ser encontrada, a floresta observável F obtida como resultado é *máxima*, isto é, não é possível se encontrar outra floresta observável em Z com um número maior de ramos do que em F .

Os resultados apresentados em [4] indicam que os tempos de execução do algoritmo em computador digital são compatíveis com o que se espera de um método para testar a observabilidade em tempo real.

2.4.2 - Implementação do Algoritmo para teste da Observabilidade

A Figura 2.2 apresenta o fluxograma utilizado para implementação do método para teste de observabilidade descrito na subseção 2.4.1. Comentários acerca dos grafos e variáveis auxiliares utilizados na implementação assim como esclarecimentos adicionais sobre alguns blocos do fluxograma da Figura 2.2 são apresentados a seguir:

Os seguintes grafos e variáveis auxiliares são usados na implementação do algoritmo.

GRAFO G_1 : Usado para testar se uma nova aresta pode ser adicionada à floresta F sem for

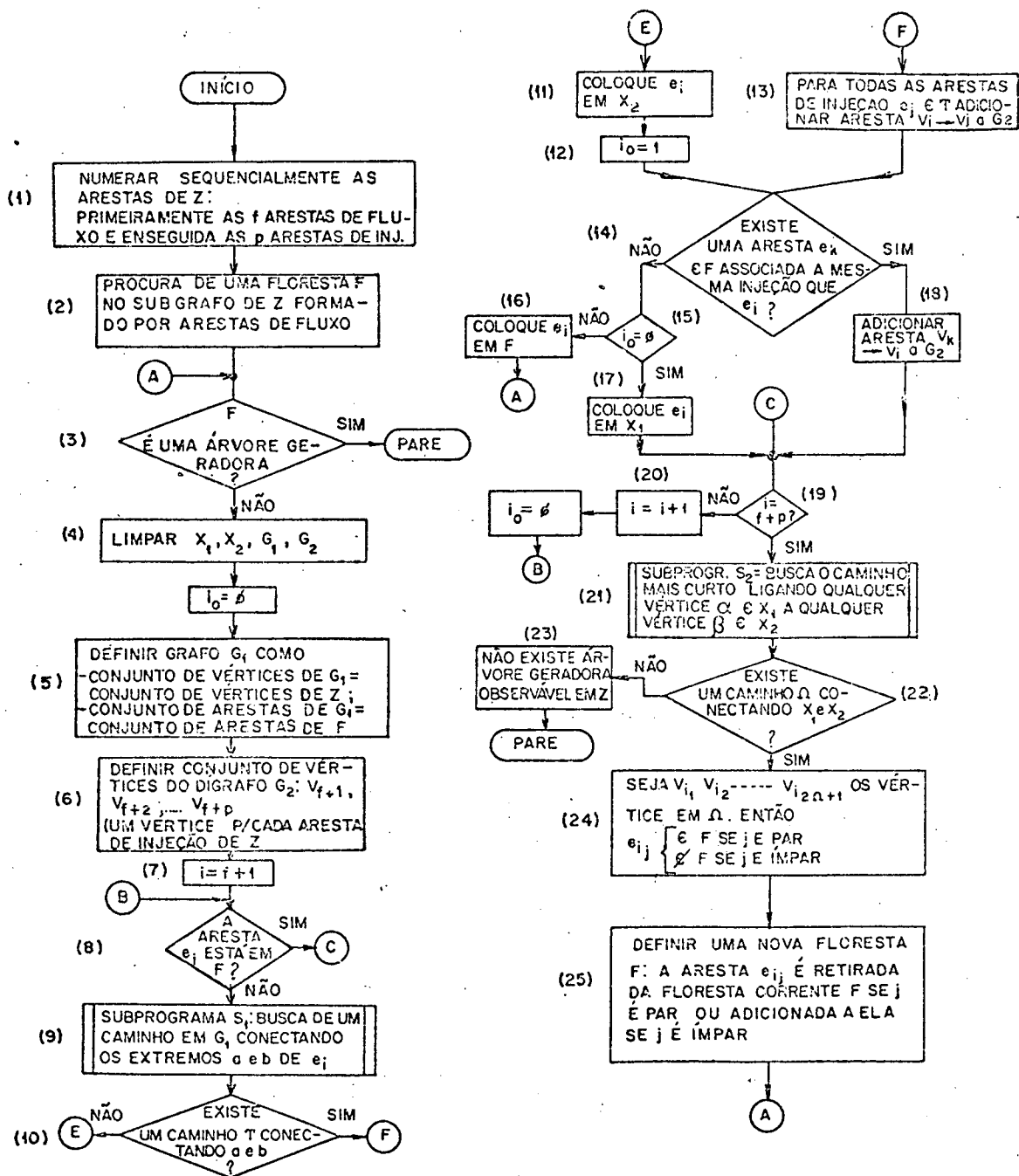


FIGURA 2.2 - Algoritmo para Observabilidade Topológica utilizando o método de intersecção de matrôides.

mar circuitos;

GRAFO G_2 : Dígrafo bipartido $G(X,Y)$;

X_1 : Conjunto de arestas que não estão presentes na floresta F .

X_2 : Conjunto de arestas que podem ser adicionadas a F sem que se formem circuitos.

i_0 : Indica uma chave;

$i_0 = 1$, se e somente se a aresta considerada foi adicionada a X_2 e

$i_0 = 0$, em caso contrário.

Alguns blocos do fluxograma da Figura 2.2 são comentados a seguir.

No bloco (3) é realizado um teste para verificarse a floresta F é uma árvore geradora observável. Em caso contrário, uma nova floresta F' é procurada, tal que o número de ramos de F' exceda de uma aresta o número de ramos de F .

Dos blocos (7) a (19) é construído o grafo G_2 . Este grafo é usado quando, no processamento de todas as arestas de injeção não houver aumento do número de ramos de F . A variável i é utilizada como contador do número de arestas de injeção processadas. As arestas do caminho τ obtido no subgrafo S_1 (bloco 9) são arestas do circuito fundamental da floresta correspondente à liga

ção e_i . Esta informação é armazenada em G_2 .

Se o resultado do teste do bloco (15) for negativo, $F + e_i$ forma uma floresta. Além disso, como F não contém nenhuma aresta associada a mesma injeção que e_i , $F + e_i$ é uma floresta observável.

No passo (19), se a decisão do teste é afirmativa significa que todas as arestas de injeção já foram processadas e a construção do grafo G_2 foi concluída. Finalmente se a resposta do teste no bloco (22) for negativa, não existe uma árvore geradora observável em X_M . Em caso contrário, é possível se provar que a nova floresta F que resulta do processamento dos blocos (24) e (25) é admissível, além disso, esta nova floresta F possui uma aresta a mais do que a anterior.

2.5 - Modificações Introduzidas no Algoritmo para a Determinação da Observabilidade

Para a busca de uma árvore geradora observável no grafo de medição Z , o algoritmo descrito na seção anterior processa primeiramente as arestas de fluxo e em seguida as arestas de injeção. Inicialmente a busca é realizada em um subgrafo de Z formado apenas por arestas de fluxo.

Se a floresta F assim obtida não é uma árvore gerada observável, faz-se necessário o processamento das arestas de injeção. Observando-se as propriedades em que se baseia a formação do grafo de medição Z (subseção 2.4.1) pode-se verificar que, na inclusão das arestas de injeção em Z , é comum que algumas destas arestas apareçam em paralelo com arestas de fluxo. Na Figura 2.1, por exemplo, a aresta de fluxo associada a t_{34} aparece em pa

ralelo com uma aresta da injeção associada à medida P_4 .

As arestas de fluxo são processados antes das arestas de injeção na formação do grafo de medição Z existindo assim, prioridade no processamento das arestas de fluxo sobre as arestas de injeção. Em consequência, não há possibilidade de que estas arestas de injeção venham fazer parte da máxima floresta observável F . Torna-se portanto, conveniente a eliminação das arestas de injeção em paralelo com as arestas de fluxo, para a redução da carga computacional na execução do algoritmo. Levando-se isto em conta, procurou-se evitar a criação (e por conseguinte o processamento das arestas de injeção paralelas a arestas de fluxo). O resultado foi a obtenção de um algoritmo computacional mais eficiente, sem qualquer prejuízo para a qualidade dos resultados.

2.6 - Considerações Finais

Neste Capítulo a teoria da observabilidade de sistemas de potência para fins de estimação de estados é apresentada, juntamente com a descrição de um algoritmo para a verificação de observabilidade. O conceito de observabilidade topológica e sua relação com o posto da matriz Jacobiana são introduzidos.

Verifica-se que a observabilidade topológica expressa a condição de que, para os casos de importância prática, o fato da matriz Jacobiana ter posto completo é equivalente à existência de uma árvore geradora observável no grafo da rede correspondente ao sistema em estudo.

O algoritmo utilizado para verificar a observabilidade de uma rede elétrica com respeito a um plano de medição M empreende a busca de uma árvore geradora observável em um grafo

que contém todas possíveis arestas associáveis à medida em M (grafo de medição Z). A existência de tal árvore significa que o sistema considerado é observável. Em caso contrário o algoritmo fornece a máxima floresta observável F .

Como parte deste trabalho, propõe-se uma modificação no método utilizado para testar a observabilidade com o objetivo de melhorar o seu tempo de execução. A modificação consiste em se evitar a criação e o processamento das arestas de injeção em paralelo com as arestas de fluxo.

C A P Í T U L O I I I

EXPANSÃO DE SUBSISTEMAS OBSERVÁVEIS

3.1 - Introdução

Nem sempre o resultado do teste de observabilidade é positivo no sentido de indicar que a estimação dos estados do sistema completo é possível. Nestes casos, os procedimentos usuais para o tratamento do problema, comentados na seção 3.2, são: a adição de pseudomedidas ao conjunto de medidas reais para a estimação dos estados na rede como um todo, ou a determinação de ilhas observáveis para a estimação dos estados de cada componente. Na seção 3.2 também é apresentada uma forma alternativa de tratar sistemas que não são completamente observáveis, a qual consiste em se expandir ao máximo um subsistema observável que contém uma barra especificada. Mostra-se como expandir o componente da máxima floresta observável (obtida através do algoritmo descrito na seção 2.4) que contém uma barra especificada, unindo-o a componentes adjacentes através do processamento de medidas de injeção. A técnica proposta é descrita em maiores detalhes na seção 3.3.

A seção 3.4 descreve sucintamente o programa principal e as rotinas utilizadas na implementação em computador digital do método proposto, assim como seu encadeamento.

Finalmente, na seção 3.5, fazem-se algumas considerações finais sobre o método desenvolvido.

3.2 - Formulação do Problema

No caso em que se verifica que um sistema de potência é não-observável com respeito a um dado plano de medição, a máxima floresta observável (obtida da técnica descrita na seção 2.4) pode ser constituída por diversos componentes. A partir do conhecimento destes componentes observáveis o problema da não-observabilidade da rede completa pode ser tratado de duas formas. A primeira consiste na utilização de pseudomedidas que, adicionadas ao conjunto de medidas disponíveis, tornem o sistema observável. As pseudomedidas mais freqüentemente utilizadas são as injeções de potência ativa e reativa nas barras, obtidas através de estudos de previsão de carga [9]. Para se utilizar esta abordagem, um método para a seleção de tais pseudomedidas deve se encontrar disponível [9].

A segunda forma de abordar o problema da não-observabilidade consiste na estimação de estados de cada um dos componentes da floresta observável. Para tanto, é necessário arbitrar em cada subsistema uma barra de referência para a tensão, em módulo (quando não houver nenhuma medida de magnitude da tensão) e ângulo [5].

Um procedimento alternativo, que poderia ser interpretado como intermediário em relação a essas duas técnicas, tem por objetivo a determinação do maior subsistema observável e que contém uma barra especificada. Os estados deste subsistema podem ser estimados utilizando-se uma única referência de ângulo de tensão.

O problema consiste em expandir o componente da máxima floresta observável que contém a barra especificada, unindo-o

a componentes adjacentes. Isto pode ser feito através do reprocessamento de medidas de injeção associadas tanto a barras do componente de interesse quanto a barras dos componentes adjacentes. O método proposto utiliza uma sequência de rotinas, para buscar todas as possíveis ligações entre as ilhas observáveis que possam ser associadas às medidas de injeção mencionadas.

Para melhor ilustrar a técnica de expansão de um componente observável, seja uma floresta máxima observável F (obtida no método da seção 2.4), constituída por três componentes (árvores) A , B e C , como mostra a Figura 3.1.

O algoritmo proposto inicialmente reconhece os componentes que formam a floresta F . As arestas destes componentes são associadas a medidas de injeção (conforme indicado na Figura 3.1) ou a medidas de fluxo. As arestas para as quais não é indicada qualquer associação com medidas de injeção são arestas de fluxo.

Na mesma figura são representadas por linhas tracejadas algumas arestas que ligam componentes adjacentes (arestas F_1, F_2, F_3, F_4). Estas arestas serão denominadas arestas de co-fronteira, e os seus vértices terminais são vértices de fronteira. Nota-se que as arestas de co-fronteira consideradas são sempre incidentes em pelo menos um vértice que apresenta medida de injeção, embora neste estágio inicial elas não sejam associadas a nenhuma medida.

Considere que a barra cujo componente se tem interesse em expandir seja representada na Figura 3.1 pelo vértice 5, o qual pertence ao componente A e será referido de agora em diante como raiz. O problema da expansão do componente da raiz consiste portanto em se re-analisar a associação das medidas de injeção em vértices de fronteira, de modo que estas medidas sejam agora associadas a arestas

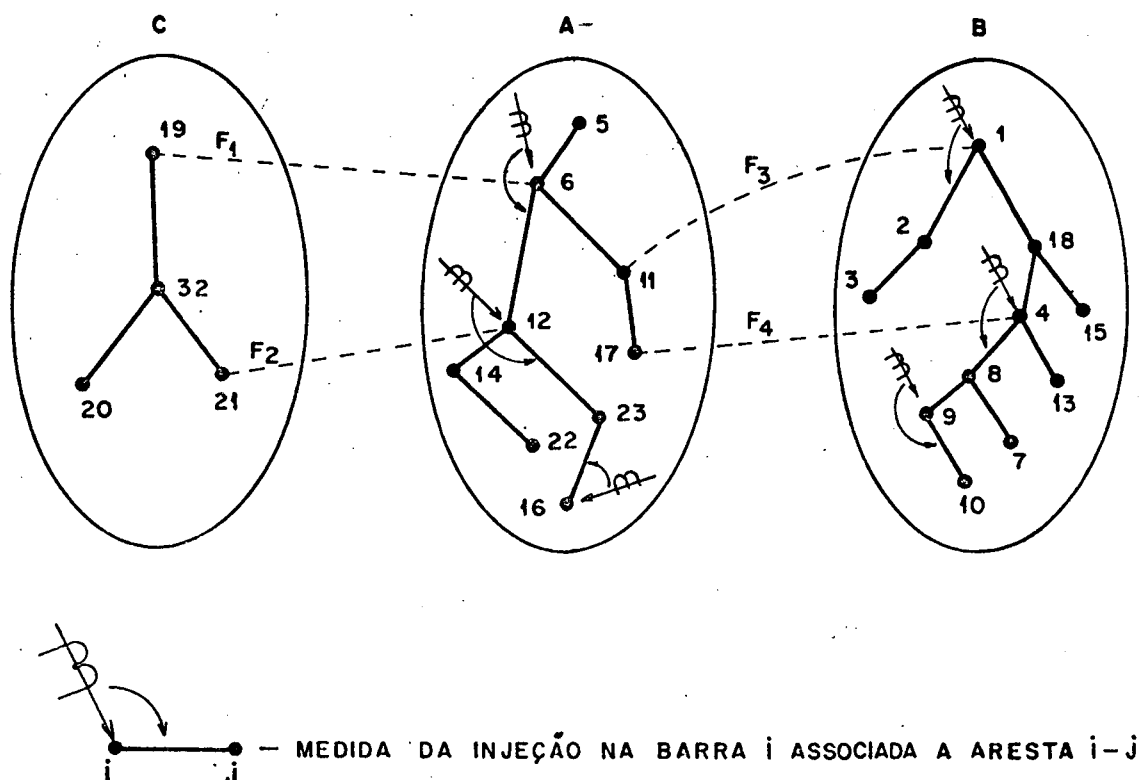


FIGURA 3.1 - Ilustração para o Processamento de Medidas Externas e Internas de Injeção.

de co-fronteira, mas contanto que esta reassociação implique necessariamente em acréscimo no número de vértices do componente da raiz. Com o objetivo de investigar estas reassociações, o método distingue dois tipos de medidas de injeção com vértices de fronteira:

- 1 - Medidas externas de injeção, que são medidas de injeção em vértices de fronteira pertencentes a componentes adjacentes ao componente da raiz, e

- 2 - *Medidas internas de injeção*, que são medidas de injeção em vértices de fronteira pertencentes ao componente da raiz.

Portanto na Figura 3.1 as medidas de injeção nos vértices 1 e 4 do componente B são externas, enquanto as medidas em 6 e 12 no componente A são internas.

Em resumo, o problema consiste em se reprocessar as medidas externas e internas de injeção nos vértices de fronteira, associando-as a arestas de co-fronteira de tal forma a maximizar o número de vértices do subsistema da raiz.

3.3 - Método para a Expansão de Subsistemas Observáveis

A partir da especificação da raiz e da identificação do componente que a contém, o algoritmo proposto para expandir este componente processa as medidas de injeção em duas etapas básicas:

- 1 - Processamento de medidas externas de injeção, e
- 2 - Processamento de medidas internas de injeção.

Para facilitar a análise do processamento das medidas de injeção na floresta observável F da Figura 3.1 esta foi dividida em duas partes: A primeira parte refere-se aos componentes A e B (Figura (3.2)) e a segunda aos componentes A e C (Figura 3.3).

A Figura (3.2) ilustra o processamento de medidas externas de injeção. Neste caso, a primeira providência é deter

minar, para cada componente de F adjacente ao componente da raiz, quais os vértices de fronteira que pertencem àquele componente e que apresentam medida de injeção. Isto é feito percorrendo-se as listas de adjacência que armazenam a estrutura do grafo da rede e as listas de apontadores que traduzem o plano de medição considerado. Na Figura 3.2, por exemplo, os vértices de fronteira 1 e 4 apresentam medidas de injeção.

Identificada a lista de medidas externas de injeção pertencentes a um determinado componente, é necessário se escolher dentre elas qual a que deve ser re-associada, deixando de corresponder a uma aresta inteiramente contida no componente adjacente para ser atribuída a uma aresta de co-fronteira. Apenas uma medida da lista pode ser usada, pois do contrário haveria a possibilidade de se formar circuitos. O critério utilizado para se selecionar esta medida é o de máximo acréscimo de vértices ao componente de raiz.

Assim, no exemplo da Figura 3.2 a associação da injeção 1 a aresta de co-fronteira F_3 possibilitaria a adição de nove vértices (1, 4, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 18) ao componente A da raiz, sendo desconectados dois vértices (2 e 3).

Por outro lado, a atribuição da medida de injeção 4 à aresta F_4 desconectaria os vértices 7, 8, 9 e 10 sendo sete vértices (1, 2, 3, 4, 13, 15, 18) acrescidos ao componente A. Segundo o critério de máximo acréscimo de vértices, portanto, a medida de injeção no vértice 1 seria a escolhida.

Após cada etapa de expansão do componente da raiz mediante a anexação de partes de componentes vizinhos, a lista de vértices dos componentes de F é atualizada. O procedimento de anexação de componentes vizinhos é então re-executado, constituindo-se

em um processo iterativo.

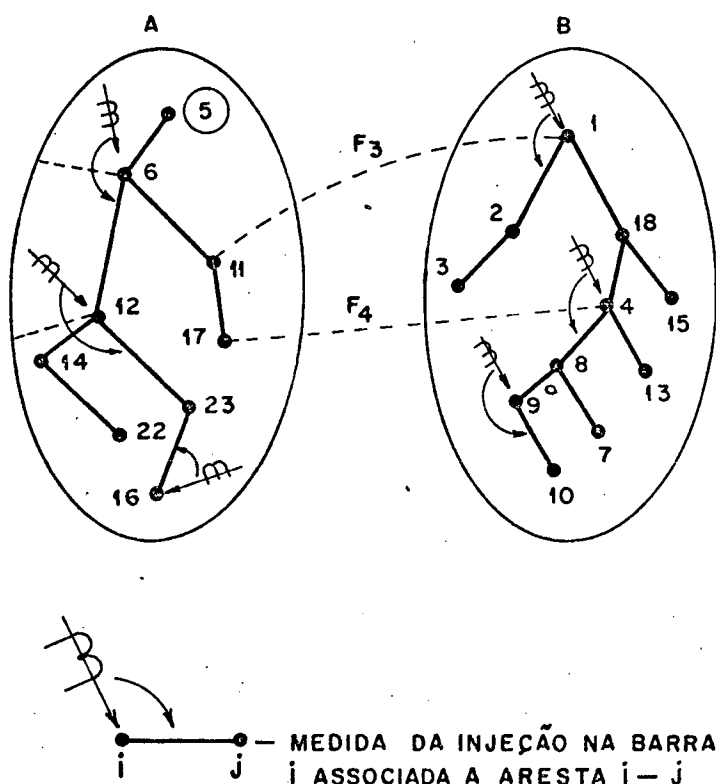


FIGURA 3.2 - Ilustração para o Processamento de Medidas Externas de Injeção.

As iterações tornam-se necessárias porque, com a expansão do componente de interesse, a sua vizinhança irá em geral mudar [1], tornando possível o aparecimento de novas injeções externas. O processo iterativo prossegue até que não se observe mais nenhum acréscimo no número de vértices do componente da raiz.

A segunda etapa do método proposto consiste no processamento de medidas internas de injeção.

A Figura 3.3 ilustra os componentes A e C da flo

resta observável F para a análise do processamento de medidas internas de injeção.

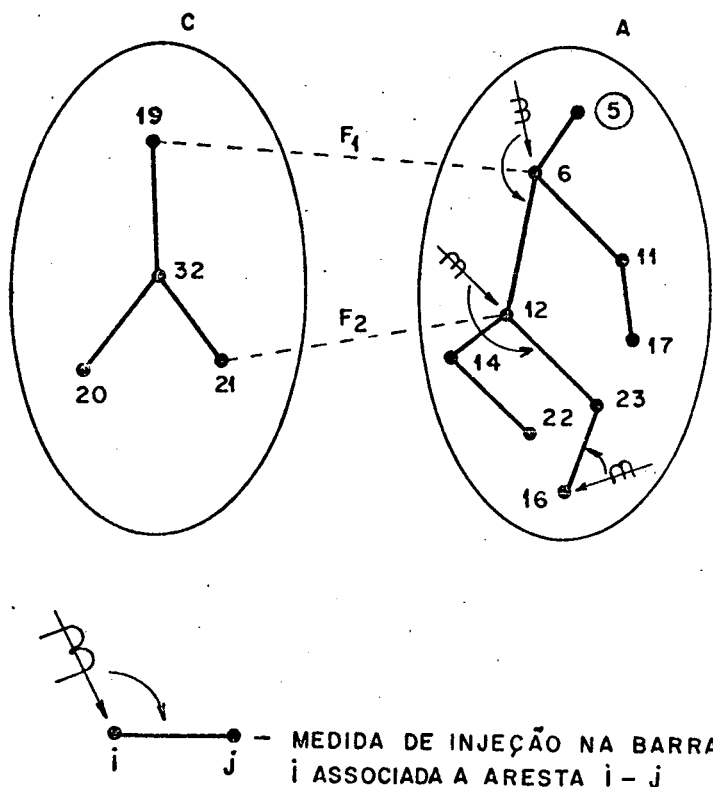


FIGURA 3.3 - Ilustração para o Processamento de Medidas Internas de Injeção.

De modo semelhante às injeções externas, procura-se associar as medidas internas de injeção a arestas de co-fronteira. Estas medidas, no entanto, encontram-se inicialmente associadas a arestas do componente da raiz. É portanto necessário que se verifique se o número de vértices do componente adjacente a serem anexados através das arestas de co-fronteira é maior do que o número de vértices que serão separados da raiz em decorrência da re-

associação da medida interna de injeção.

Observando-se a Figura 3.3 vê-se que, caso a medida de injeção interna no vértice 6 do componente A for re-associada para a aresta de co-fronteira F_1 , os vértices 12, 14, 16, 22 e 23 serão separados da raiz, sendo a ela anexados os quatro vértices (19, 20, 21 e 32) do componente C. Evidentemente trata-se de uma re-associação desvantajosa, que deve ser evitada. A situação é diferente para a medida de injeção no vértice 12, cuja re-associação à aresta F_2 implica na perda dos vértices 16 e 23. Mas, o ganho dos mesmos quatro vértices do componente C torna-a desejável. Uma única medida interna de injeção deve ser selecionada para ligar um determinado componente ao componente da raiz, pois do contrário haveria a possibilidade da formação de circuitos.

Para investigar a conveniência em se proceder a re-associação de medidas de injeção interna, o método proposto usa um procedimento que as classifica em ordem crescente de número de vértices que seriam separados da raiz se as arestas de injeção a elas associadas fossem descartadas. Com o uso desta classificação e o conhecimento do número de vértices dos componentes adjacentes ao componente da raiz, pode-se imediatamente decidir sobre quais injeções internas devem ser atribuídas à aresta de co-fronteira.

Após todas as re-associações de medidas internas terem sido investidas e a lista de vértices dos componentes da floresta F ter sido atualizada de acordo com as modificações realizadas, é possível que a anexação de componentes vizinhos produza o aparecimento de novas medidas internas de injeção. Há portanto a possibilidade de aumento no número de barras do componente da raiz, se estas novas injeções forem processadas. Para prever esta situação, o processamento de medidas de injeções internas é repetido de

modo iterativo, até que não seja mais possível se expandir o componente da raiz.

O algoritmo para a expansão de um componente que contém uma determinada barra está representado pelo fluxograma da Figura 3.4.

Um aprimoramento adicional ao método pode ainda ser obtido através do acréscimo de um laço mais externo, permitindo o reproprocessamento de medidas externas de injeção sempre que o processamento de medidas internas resultar em expansão do componente da raiz, conforme ilustra o fluxograma da Figura 3.5.

3.4 - Implementação do Método Proposto para Expansão de Subsistemas Observáveis

Nesta seção apresenta-se uma descrição geral do programa principal *EXTINT*, e das rotinas utilizadas para expandir ao máximo um subsistema observável que contém determinada barra.

3.4.1 - Descrição Geral do Programa Principal EXTINT

Os dados de entrada do programa são basicamente vetores que traduzem a topologia da rede e o plano de medição considerado.

Após a formação de alguns vetores e apontadores auxiliares para o processamento de medidas de injeção, o programa principal chama a rotina *SUBMAT*, a qual é baseada no algoritmo descrito no Capítulo 2 para testar a observabilidade de sistema com respeito a um dado plano de medição. O grafo de medição Z definido

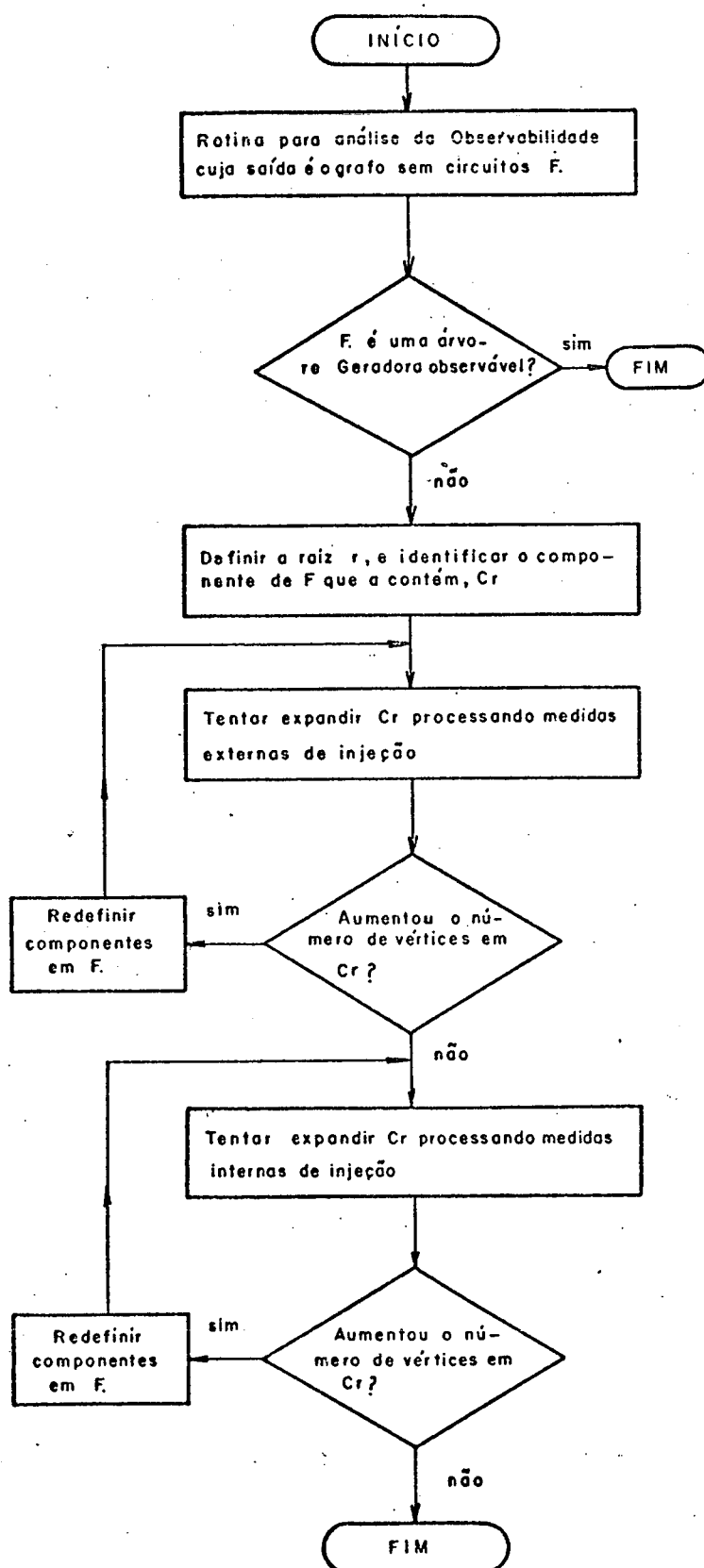


FIGURA 3.4 - Fluxograma para Expansão de um Componente da Máxima Floresta Observável.

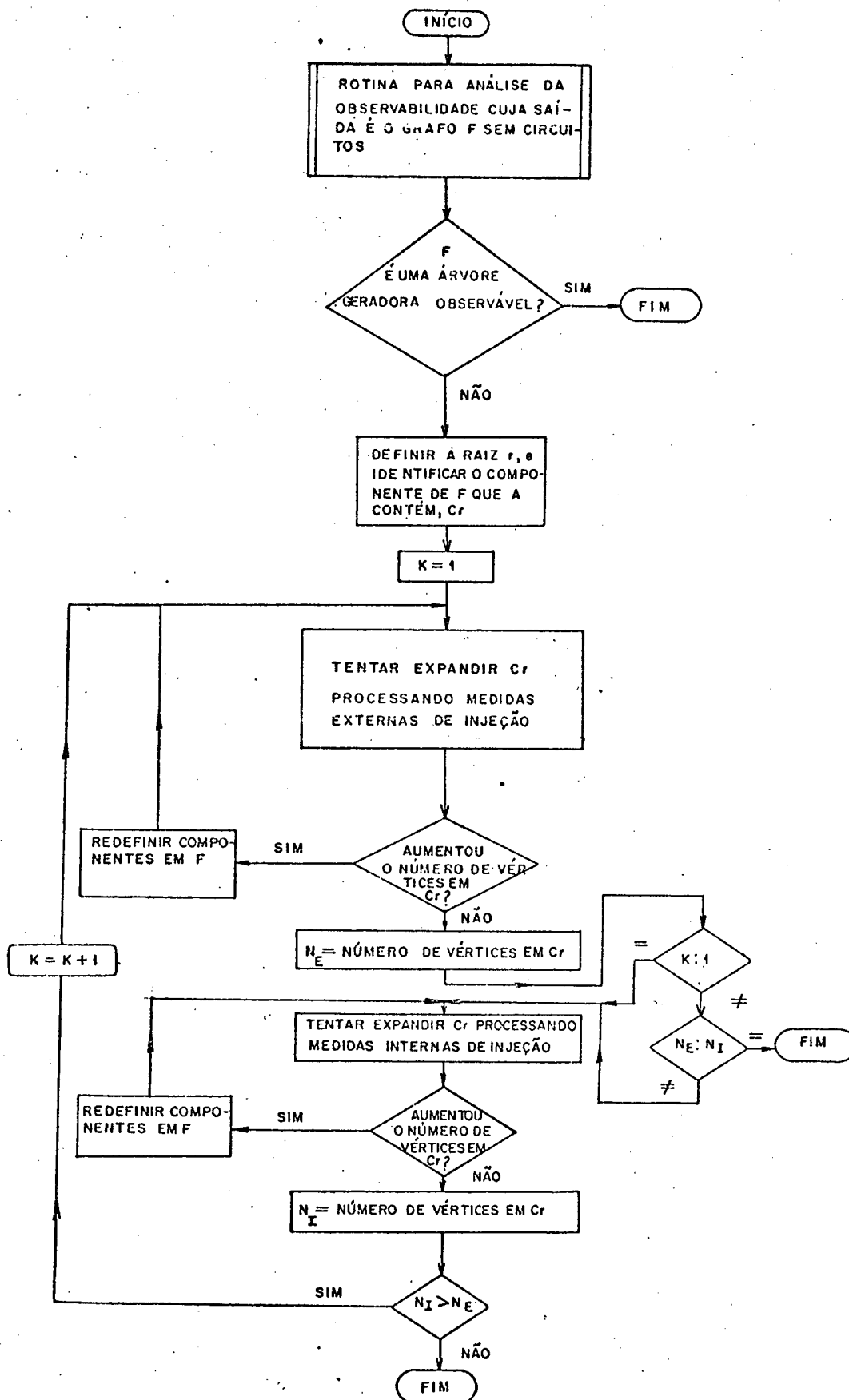


FIGURA 3.5 - Fluxograma para a Expansão de um Componente da Máxima Floresta Observável com a inclusão de um laço externo para Reprocessamento de Injeções Externas.

na subestação 2.4.1 é inicialmente formado em SUBMAT. Sua estrutura é obtida estendendo-se a lista de arestas do grafo da rede através da inclusão das arestas de injeção. SUBMAT então verifica se pode ser formada uma árvore geradora observável a partir do grafo de medição associando cada medida disponível a uma aresta do grafo. Caso isto não seja possível, a rotina retorna com a máxima floresta observável F .

Antes de iniciar o processamento de injeções externas e internas o programa principal forma o vetor apontador IPP, de dimensão igual ao número de barras do sistema, o qual indica se a injeção em cada barra é ou não medida. No caso da injeção na barra i ser monitorada, $IPP(i)$ fornece a posição inicial na lista estendida de arestas, em que se encontram as arestas correspondentes à injeção em i . Por construção, todas as arestas associadas a uma mesma injeção aparecem em posições sucessivas na lista estendida de arestas. Assim, por exemplo, se a injeção i estão associadas k arestas, que aparecem nas posições $j, j + 1, \dots, j + k - 1$, então $IPP(i) = j$.

Identifica-se o componente ao qual pertence a barra especificada (raiz) e os elementos deste componente.

A seguir é acionada a rotina MEDEXT que processa as medidas externas de injeção através das rotinas descritas na seção 3.4.2.

Efetua-se um teste para verificação de acréscimo do número de barras no componente da raiz. Em caso afirmativo, inicia-se um processo iterativo para a busca de novos vértices de fronteira contendo medida de injeção externa para aumentar o componente selecionado. A não ocorrência de aumento do número de vértices no componente da raiz, indica o término do processamento das medidas externas de injeção.

É iniciado então o processamento das medidas internas de injeção, através da rotina MEDINT, que faz uso das rotinas descritas na seção 3.4.3. Um novo teste é feito para verificar se

houve acréscimo do número de barras no componente da raiz. Existindo aumento, um processo iterativo semelhante ao descrito anteriormente é executado, ao fim do qual é finalmente obtido o subsistema observável expandido.

3.4.2 - Rotinas Utilizadas para o Processamento das Medidas Externas de Injeção

O diagrama de blocos da Figura 3.6 apresenta o encaideamento entre as rotinas chamadas por MEDEXT para o processamento das medidas externas de injeção. Um breve comentário sobre cada bloco é feito a seguir:

Rotina VIZNHO

A partir da lista de adjacência dos vértices do componente da raiz, a rotina VIZNHO procura todos os vértices externos adjacentes ao componente da raiz cujas injeções são medidas. As arestas de co-fronteira que ligam estes vértices ao componente da raiz também são determinadas. A rotina utiliza o vetor apontador (IPP) para a construção do vetor de vértices externos de fronteiras (VIZ) e do vetor de arestas de co-fronteira (COFT)

Rotina ORDVIZ

Organiza os vértices externos de fronteira cuja injeção é medida de acordo com os componentes a que pertencem, formando o vetor VIZ. As arestas de

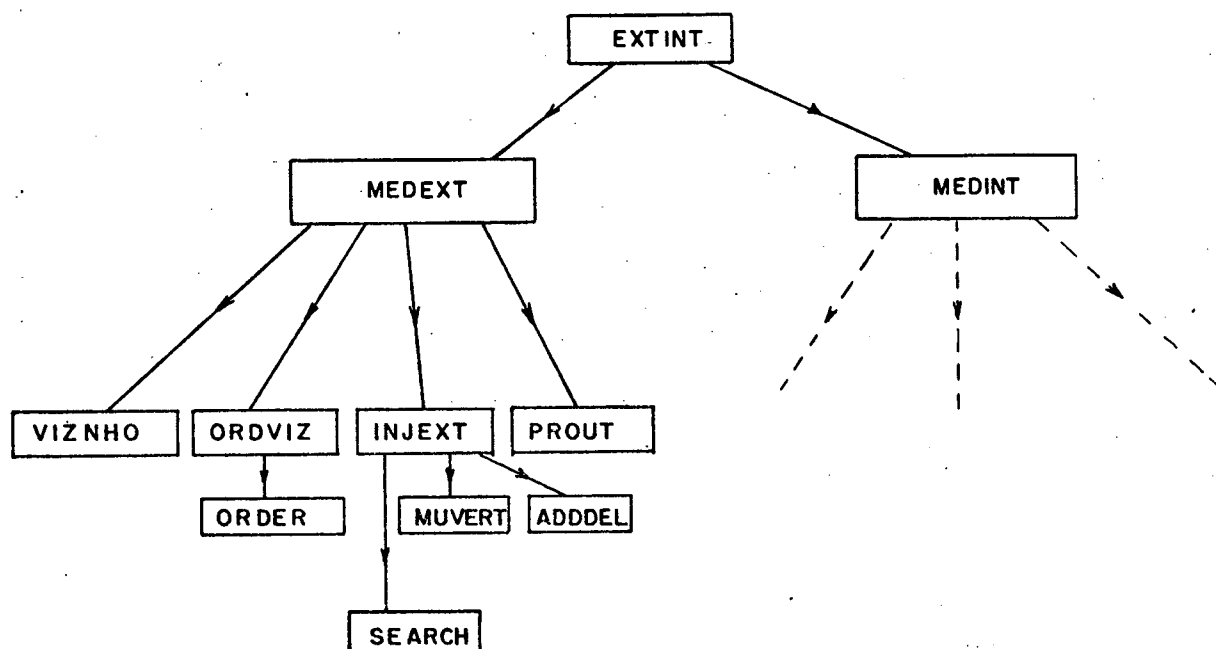


FIGURA 3.6 - Diagrama de Bloco das Rotinas utilizadas no Processamento das Medidas Externas de Injeção.

co-fronteira associadas são ordenadas de forma correspondente (vetor COFT)

Rotina *ORDER*

Dado um vetor *X* esta rotina ordena os elementos de *X* em ordem crescente. É chamada por *ORDVIZ* para ordenar o vetor *VIZ*.

Rotina SEARCH

O objetivo desta rotina é determinar para cada vértice cuja injeção é medida, quantos e quais os novos vértices que seriam adicionados ao componente da raiz se a medida de injeção fosse associada a uma aresta de co-fronteira. Esta informação é fundamental para que se possa decidir qual injeção pertencente a um mesmo componente é mais vantajosa (ver Figuras 3.2 e 3.3).

Rotina INJEXT

Nesta rotina é executada a expansão do componente que contém a raiz pelo processamento de injeção externas. Para isto INJEXT atualiza a lista encadeada da floresta *F* e o vetor VERTEX, que identifica o componente a que pertence cada vértice. Caso ocorra mais de uma medida de injeção em um mesmo componente externo, o algoritmo seleciona a medida a ser associada à aresta de co-fronteira tendo em conta os resultados fornecidos pela rotina SEARCH.

Rotina MUVERT

As alterações na estrutura da floresta, devido ao aumento do componente da raiz, também ocorrem no vetor VERTEX, o qual indica o componente a que pertence cada vértice da rede. A rotina MUVERT implementa esta atualização no vetor VERTEX. Conforme as

mudanças ocorridas na estrutura da floresta, pode também ser necessário se atualizar o número de seus componentes.

Rotina ADDDEL

A exemplo da rotina MUVERT, a rotina ADDDEL é acionada por INJEXT para atualizar as estruturas que armazenam a floresta corrente F. ADDDEL atualiza a lista encadeada de F retirando a aresta originalmente associada a medida de injeção considerada e substituindo-a por uma aresta de co-fronteira, que agora passa a ser atribuída àquela injeção (ver Figuras 3.2 e 3.3).

Rotina PROUT

Rotina utilizada para imprimir a floresta obtida após o processamento das medidas externas e internas de injeção.

3.4.3 - Rotinas Utilizadas para o Processamento das Medidas Internas de Injeção

A Figura 3.7 apresenta um diagrama de blocos contendo as rotinas acionadas por MEDINT para o processamento das medidas internas de injeção.

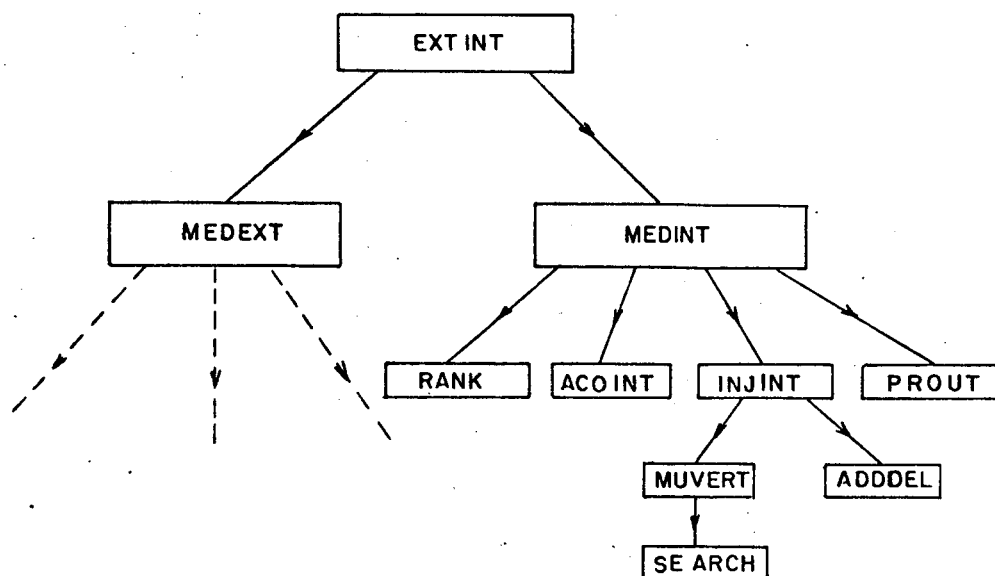


Figura 3.7 - Diagrama de Blocos das Rotinas utilizadas no Processamento das Medidas Internas de Injeção.

Rotina RANK

Esta rotina constrói, de maneira sistemática, uma tabela de classificação dos vértices pertencentes ao componente da raiz. Esta tabela consta de todos os vértices do componente da raiz e as arestas que ligam estes vértices ao seu precedente. Para os vértices em que a injeção é medida, RANK determina os vértices que seriam desconectados do componente da raiz pela re-associação da medida de injeção (ver Figura 3.3). Esta informação é usada para decidir qual medida de injeção interna propicia um ganho maior em termos do número de vértices

anexados ao componente da raiz.

Rotina AC0INT

Nesta rotina é feita a seleção da aresta de co-fronteira que ligará o vértice de fronteira do componente da raiz determinada na rotina RANK, a um componente adjacente.

Rotina INJINT

Realiza-se nesta rotina a expansão do componente que contém a raiz devido ao processamento de medidas internas de injeção. Portanto INJINT atualiza a lista encadeada da floresta F e o vetor VERTEX. Com os resultados obtidos da rotina RANK pode-se concluir se existe ou não vantagem em re-associar a medida de injeção com uma aresta de co-fronteira.

Rotina MUVERT, SEARCH, ADDDEL e PROUT (Ver seção 3.4.2).

3.5 - Considerações Finais

O método desenvolvido neste Capítulo, pesquisa os vértices de fronteira que apresentam medidas de injeção, de modo a expandir um determinado componente observável. Isto é feito mediante re-associações das medidas de injeção com arestas de co-fronteira. Estas re-associações se realizam sempre que proporcionarem acréscimos reais do número de vértices do componente da raiz.

O algoritmo apresentado neste Capítulo processa me didas externas e internas de injeção, nesta ordem. Ao término do processamento obtém-se o maior componente observável expandido que contém a raiz.

No Capítulo seguinte será investigado o problema da estimação de estados para este subsistema observável.

C A P Í T U L O · IV

ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS NÃO-OBSERVÁVEIS [6]

4.1 - Introdução

Quando o teste de observabilidade em tempo real revela que um sistema de potência é não-observável com respeito a um dado plano de medição pode-se optar por estimar os estados para os subsistemas observáveis em lugar de estimá-los para o sistema completo, conforme foi comentado na seção 3.2. Portanto, para os subsistemas observáveis que correspondem a uma floresta obtida de um algoritmo que testa a observabilidade (Capítulo II), ou da expansão de um subsistema observável (Capítulo III) torna-se necessário que se disponha de um procedimento para se estimar os estados das partes observáveis.

O objetivo deste Capítulo é apresentar um método para estimar os estados das partes observáveis, sugerido por Broussolle e Le Roy [6].

A seção 4.2 trata dos fundamentos teóricos do método, cujos princípios são apresentados na seção 4.3. Finalmente, na seção 4.4, são feitas considerações finais sobre o capítulo.

4.2 - Fundamentação Teórica [6]

Uma rede elétrica não totalmente observável é constituída de ilhas observáveis e ilhas não-observáveis.

Os vértices que fazem parte de uma determinada ilha observável correspondem a barras designadas como barras *internas*, e os vértices das ilhas não-observáveis adjacentes são referidos como barras *externas*. Os vértices de *fronteira* correspondem as barras que pertencem tanto à ilha observável, quanto às ilhas não-observáveis adjacentes.

A Figura 4.1 ilustra a divisão de uma rede em porção *interna* (observável), de *fronteira* e *externa* (não-observável).

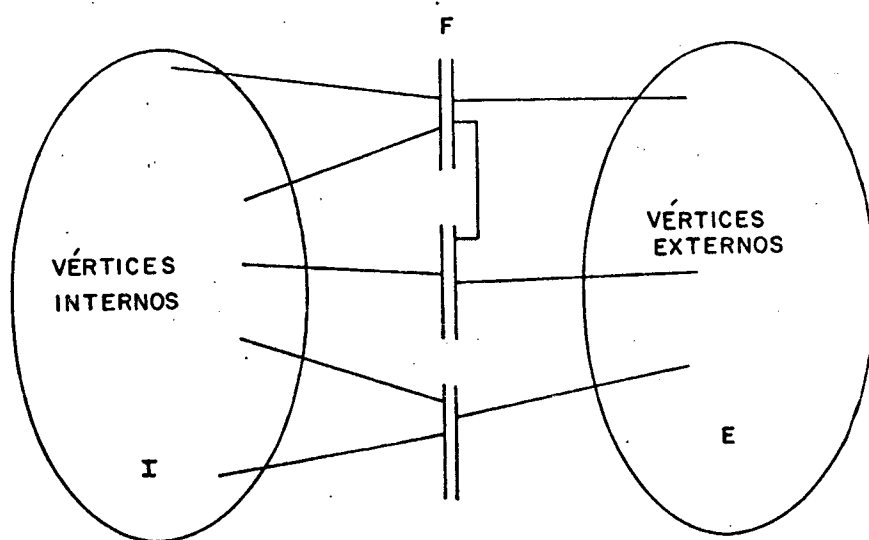


FIGURA 4.1 - Representação de uma Rede Elétrica Particionada em Região Interna, Fronteira e Externa.

Um sistema elétrico pode ser representado pela equação (4.1) que relaciona as *injeções* de corrente, as *tensões* nas barras e a *topologia* característica da rede (Y):

$$Y \cdot \underline{V} = \underline{I} \quad (4.1)$$

Onde:

Y - matriz de admitância das barras

\underline{V} - vetor das tensões nas barras

\underline{I} - vetor das injeções de corrente nas barras.

Particionando Y , V e I de modo a explicitar as partes internas, externa e de fronteira do sistema, a equação (4.1) passa a ser expressa na forma:

$$\begin{bmatrix} Y_{II} & Y_{IF} & 0 \\ Y_{FI} & Y_{FF} & Y_{FE} \\ 0 & Y_{EF} & Y_{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_I \\ V_F \\ V_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_I \\ I_F \\ I_E \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Examinando os componentes da matriz admitância Y observa-se que:

Y_{II} - matriz de admitância das barras do subsis

tema interno.

- Y_{IF} - matriz de admitância entre barras do sub sistema interno e de fronteira.
- Y_{EE} - matriz de admitância das barras do subsis tema externo.
- Y_{FE} - matriz de admitância entre as barras per tencentes à fronteira e o subsistema exter no.

Os sub-índices I, F, E usados indicam respectivamente, as partes consideradas da rede interna, de fronteira e externa. Os valores nulos na matriz Y informam a não existência de conexão direta entre as barras do subsistema externo e interno.

O efeito de se atribuir valores fictícios, como os obtidos da previsão de carga nas barras, às injeções nas barras de um subsistema não-observável externo se refletirá no subsistema interno, o que é claramente indesejável. Para evitar esta influência sobre o subsistema interno, verificar-se-á através do desenvolvimento a seguir, que algumas restrições devem ser impostas ao plano de medição no que diz respeito às medidas de injeção nas barras de fronteiras e medidas no sistema externo.

Seja a rede elétrica representada pela equação (4.2) onde se supõe que as injeções no sistema externo sofrem uma variação de I_E para I'_E . O problema que se coloca é o de se saber que valor deve assumir o vetor de injeções nas barras de fronteira, de modo que a variação em I_E não interfira no cálculo das tensões nas barras do subsistema interno.

As considerações acima são representadas na equa

ção (4.3).

$$\begin{bmatrix} Y_{II} & Y_{IF} & 0 \\ Y_{FI} & Y_{FF} & Y_{FE} \\ 0 & Y_{EF} & Y_{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_I \\ V_F \\ V_E' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_I \\ I_F' \\ I_E' \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A partir da equação (4.3) obtém-se o vetor das injeções de fronteira dado por:

$$Y_{FI} V_I + Y_{FF} V_F + Y_{FE} V_E' = I_F' \quad (4.4)$$

Igualmente, o vetor das injeções externas I_E' é obtido de (4.3) como:

$$Y_{EF} V_F + Y_{EE} V_E' = I_E' \quad (4.5)$$

Resolvendo-se a equação acima para V_E' , tem-se:

$$Y_{EE}^{-1} I_E' - Y_{EE}^{-1} Y_{EF} V_F = V_E' \quad (4.6)$$

Finalmente substituindo-se (4.6) em (4.4) obtém-se a injeção de fronteira I_F' em função dos novos valores da injeção no subsistema externo I_E' .

A equação (4.7) informa o valor que as injeções de fronteira devem assumir devido às variações nas injeções externas

(do valor I_E para I'_E).

$$I'_F = Y_{FI} V_I + (Y_{FF} - Y_{FE} Y_{EE}^{-1} Y_{EF}) V_F + Y_{FE} Y_{EE}^{-1} I'_E \quad (4.7)$$

Da mesma forma, a partir da equação (4.2), pode-se obter o valor do vetor de injeções de fronteira (I_F) em função de V_I e V_F .

Assim:

$$I_F = Y_{FI} V_I + (Y_{FF} - Y_{FE} Y_{EE}^{-1} Y_{EF}) V_F + Y_{FE} Y_{EE}^{-1} I_E \quad (4.8)$$

Observando-se as equações (4.7) e (4.8), verifica-se que estas distinguem-se somente no terceiro termo, devido à mudança ocorrida na medida de injeção do sistema externo. Logo,

$$I'_F = I_F + Y_{FE} Y_{EE}^{-1} (I'_E - I_E) \quad (4.9)$$

Pode-se particularmente escolher $I'_E = 0$ e determinar a partir da equação (4.9), o vetor de injeções equivalentes nas barras de fronteira tal que o cálculo de V_I não seja afetada pela variação de I_E .

A escolha do valor atribuído ao vetor de injeções da rede externa (I'_E) pode portanto ser feita livremente, sem afetar as tensões na rede interna, contanto que as injeções de fronteira (I'_F) assumam o valor dado pela equação (4.7).

4.3 - Método para Estimar os Estados de Sistemas Não-Observáveis [6]

Seja um sistema contendo um subsistema observável e um subsistema não observável. A região interna da rede é a parte observável e a região externa a parte não-observável. Os vértices

pertencentes simultaneamente às duas regiões são os vértices de fronteira. As tensões nestes vértices podem ser estimadas. O mesmo não acontece contudo com suas injeções devido ao fato de que, a outra barra terminal de algumas das linhas incidentes nos vértices de fronteira pertencem ao subsistema não-observável.

A proposta deste método é a recuperação de modo artificial da observabilidade do sistema, reconstituindo assim a observabilidade da rede elétrica. O processo utilizado baseia-se na criação de medidas fictícias de injeção de potência ativa e reativa na parte não-observável, após terem sido descartadas todas as possíveis medidas, (injeções, fluxos, tensões, potências ativa e reativa) externas ao subsistema observável. Não serão igualmente consideradas as medidas de injeção nas barras de fronteira, para que estas quantidades assumam livremente valores compatíveis com as mudanças da rede externa.

As medidas na região observável podem ser redundantes, mas o mesmo não pode ocorrer na parte não-observável. As medidas de injeção estabelecidas na região não-observável devem obrigatoriamente ser medidas críticas [9]. (Uma medida é crítica se a sua perda reduz o posto da matriz Jacobiana de uma unidade [5]). A razão para isto é que os resíduos associados às medidas críticas são nulos, o que significa que os erros não são detectáveis e também que erros nestas medidas não contaminarão as estimativas dos estados relativos ao subsistema observável [8].

Ao se usar o método em questão, as capacitâncias e reatâncias entre a rede e a terra podem ser desprezadas supondo-se que seus efeitos estão implicitamente representados nos valores das injeções.

As medidas de injeção fictícias aplicadas nos vértices não-observáveis podem ser:

- a) *Nulas*
- b) *Os últimos valores estimados*
- c) *Valores previstos para injeções nas barras ex*
ternas.

A atribuição de valores nulos para as injeções no sistema externo, ítem (a) acima, traduz a hipótese que não se tem nenhuma informação sobre as injeções do sistema externo. Pode-se estimar os estados do sistema global como se fosse observável, com a ressalva de que se valores arbitrários de injeção foram atribuídas na região não-observável, apenas as estimativas dos estados, referentes ao subsistema interno de interesse terão significado. Os fluxos estimados para a parte não-observável, no caso do uso de valores nulos para injeções externas, não apresentam significado real.

O emprego de valores de injeções fictícias nas barras da região não-observável dados nos ítems (b) e (c) acima tornam os fluxos estimados para a parte não-observável mais próximos da realidade.

O método de Broussolle e Le Roy pode ser facilmente estendido para o caso da existência de várias regiões não-observáveis, e também para o caso de um sistema composto de várias regiões observáveis [6].

4.4 - Considerações Finais

Este Capítulo, trata do problema de estimação de estados de sistemas não-observáveis e descreve um método para este fim, proposto por Broussolle e Le Roy [6].

Para se estimar os estados da rede não-observável, usam-se medidas críticas de injeção em todas as barras do subsistema externo após terem sido descartadas as medidas externas ao subsistema observável. As medidas críticas utilizadas no subsistema não-observável, podem ser considerados iguais a zero, se houver total falta de informação a respeito das injeções do sistema externo.

O método descrito neste Capítulo é empregado no Capítulo V para verificar os resultados do algoritmo de expansão de subsistemas observáveis apresentado no Capítulo III.

C A P Í T U L O V

RESULTADOS NUMÉRICOS

5.1 - Introdução

Neste Capítulo são apresentados os resultados de uma série de testes do método de expansão de um subsistema observável descrito no Capítulo III.

Dois sistemas-teste do IEEE, de 14 e 30 barras e um sistema da Eletrosul de 48 barras são utilizados nos testes de desempenho do método desenvolvido para a expansão de um subsistema observável. O programa correspondente foi implementado no computador IBM 4341 da UFSC.

Os resultados obtidos são verificados com o auxílio de um programa de estimação de estados. Para aplicar o método de estimação dos estados da parte observável do sistema visto no Capítulo IV, faz-se necessário o uso de determinadas pseudomedidas de fluxo, ou o conhecimento das injeções de potência na parte observável do sistema.

No Apêndice I, dois exemplos são ilustrados por meio de grafos mostrando as etapas de expansão de um componente observável obtido pelo uso do algoritmo de observabilidade da seção 2.4.

No Apêndice II mostra-se, para cada sistema considerado, o diagrama unifilar e os planos de medição utilizado em cada teste.

5.2 - Sistemas-Teste Utilizados

O desempenho da técnica de expansão de subsistemas observáveis foi testado considerando três sistemas de potência, cujos diagramas unifilares são apresentados no Apêndice II, juntamente com os diferentes planos de medição utilizados para cada sistema.

Exemplo 1: Sistema de Potência de 14 Barras - (Sistema A)

Com o sistema-teste do IEEE de 14 barras e 20 linhas foram realizados 6 testes, sendo seus resultados verificados utilizando-se o programa de estimação de estados.

Exemplo 2: Sistema de Potência de 30 Barras - (Sistema B)

O sistema-teste do IEEE de 30 barras e 41 linhas foi também utilizado nos testes descritos a seguir, sendo apresentados 4 casos que diferem entre si nos planos de medição utilizados. Os resultados obtidos foram comprovados com o uso de um programa de estimação de estados.

Exemplo 3: Sistema de Potência de 48 Barras - (Sistema C)

Este sistema de 48 barras e 61 linhas faz parte do sistema Eletrosul-Celesc. Realizaram-se 4 testes, sendo que os resultados obtidos mostram um significativo aumento do número de barras no subsistema observável que contém a raiz.

5.3 - Resultados Obtidos

Para cada sistema-teste, foram simulados diversos planos de medição, todos deficientes no sentido de que não possibilitam a obtenção de uma árvore geradora observável. A utilização do programa de análise de observabilidade baseado no algoritmo da referência [4] fornece a máxima floresta observável e o número original de barras no componente da raiz, NB_0 . O algoritmo de expansão do componente observável é então aplicado. As tabelas das subseções 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3 apresentam os resultados da expansão, discriminando o aumento no número de barras devido ao processamento de medidas de injeção externas (NB_E) e internas (NB_I). Como se observa nestas tabelas, cada uma destas contribuições depende do plano de medição considerado, mas em geral o uso do algoritmo propicia um acréscimo significativo de barras do componente da raiz.

5.3.1 - Exemplo 1: Sistema de 14 Barras - (Sistema A)

Os testes realizados com este sistema são apresentados na tabela 5.1.

Vê-se da tabela 5.1 que em alguns casos a expansão do subsistema observável é devida apenas ao processamento de medidas de injeções externas, em outros a contribuição é apenas devida às injeções internas e, em um dos casos estudados ambos os tipos de medidas de injeção contribuem para expandir o subsistema observável.

TABELA 5.1 - Resultados dos Testes Realizados para
o Sistema de 14 Barras.

SISTEMA	CASO	MEDIDAS			NC ⁽²⁾	RAIZ	NB _O ⁽³⁾	$\Delta NB^{(4)}$			NBF = NB _O + ΔNB
		INJEÇÕES	FLUXO	TOTAL ⁽¹⁾				$\Delta NB_E^{(5)}$	$\Delta NB_I^{(6)}$	TOTAL	
14 BARRAS	A1	8	12	21	2	13	3	8	-	8	11
	A2	4	14	19	4	2	6	-	1	1	7
	A3	10	10	21	2	13	3	8	-	8	11
	A4	10	12	23	3	1	7	-	1	1	8
	A5	12	14	27	2	1	7	-	3	3	10
	A6	6	14	21	3	8	2	6	1	7	9

- (1) Medidas de fluxo e injeção ativas e reativas aos pares e uma medida de tensão.
- (2) Número de componentes da floresta F original.
- (3) Número inicial de barras no componente da raiz.
- (4) Acréscimo total no número de barras do componente da raiz.
- (5) Acréscimo no número de barras devido ao processamento de medidas externas de injeção.
- (6) Acréscimo no número de barras devido ao processamento de medidas internas de injeção.

5.3.2 - Exemplo 2: Sistema de 30 Barras - (Sistema B)

Neste sistema realizaram-se 4 casos teste estando os resultados na Tabela 5.2.

TABELA 5.2 - Resultados dos Testes Realizados para o Sistema de 30 Barras.

SISTEMA	CASO	MEDIDAS			NC ⁽²⁾	RAIZ	NB _O ⁽³⁾	ΔNB ⁽⁴⁾			NBF = NB _O + ΔNB
		INJEÇÕES	FLUXO	TOTAL ⁽¹⁾				$\Delta NB_E^{(5)}$	$\Delta NB_I^{(6)}$	TOTAL	
30 BARRAS	B1	22	18	41	3	10	7	14	-	14	21
	B2	22	16	39	4	1	12	-	5	5	17
	B3	18	24	43	3	1	11	-	7	7	18
	B4	16	20	37	3	1	12	-	4	4	16

- (1) Medidas de fluxo e injeções ativas e reativas aos pares e uma medida de tensão.
- (2) Número de componentes da floresta F original.
- (3) Número inicial de barras no componente da raiz.
- (4) Acréscimo total no número de barras do componente da raiz.
- (5) Acréscimo no número de barras devido ao processamento de medidas externas de injeção.
- (6) Acréscimo no número de barras devido ao processamento de medidas internas de injeção.

5.3.3 - Exemplo 3: Sistema de 48 Barras - (Sistema C)

Os resultados dos testes realizados estão apresentados na Tabela 5.3. Conforme mostra esta tabela, existe um acrêscimo significativo no aumento do número de barras no componente da raiz para a maioria dos casos estudados.

TABELA 5.3 - Resultados dos Testes Realizados para o Sistema de 48 Barras.

SISTEMA	CASO	MEDIDAS			NC ⁽²⁾	RAIZ	NB _O ⁽³⁾	ΔNB ⁽⁴⁾			NBF = NB _O + ΔNB
		INJEÇÕES	FLUXOS	TOTAL ⁽¹⁾				ΔNB_E ⁽⁵⁾	ΔNB_I ⁽⁶⁾	TOTAL	
48 BARRAS	C1	22	18	41	4	26	3	14	-	14	17
	C2	22	16	39	4	2	15	-	2	2	17
	C3	22	14	37	7	40	3	5	1	6	9
	C4	22	14	37	7	35	3	4	2	6	9

(1) Medidas de fluxo e injeções ativas e reativas aos pares e uma medida de tensão.

(2) Número de componentes da floresta F original.

(3) Número inicial de barras no componente da raiz.

(4) Acrêscimo total no número de barras do componente da raiz.

(5) Acrêscimo no número de barras devido ao processamento de medidas externas de injeção.

(6) Acrêscimo no número de barras devido ao processamento de medidas internas de injeção.

5.3.4 - Tempo de Execução

A Tabela 5.4 apresenta o tempo computacional para alguns dos casos estudados. Foram registrados os tempos para leitura de dados, determinação da máxima floresta observável (algoritmo do Capítulo II), processamento de medidas externas de injeções e processamento de medidas internas de injeções (algoritmo do Capítulo III).

TABELA 5.4 - Tempo Computacional em Segundos para a Expansão do Subsistema Observável.

SISTEMA	CASO	LEITURA DE DADOS	PROGRAMA DE OBSERVABILIDADE	INJEÇÕES EXTERNAS	NÚMERO DE ITERAÇÕES	INJEÇÕES INTERNAS	NÚMERO DE ITERAÇÕES	(*) TEMPO TOTAL DE PROCESSAMENTO
14 BARRAS	A1	0.500 E-01	0.157	0.383	3	0.117	-	0.657
	A2	0.500 E-01	0.180	0.733 E-1	-	0.317	1	0.570
	A6	0.500 E-01	0.207	0.190	1	0.340	1	0.737
30 BARRAS	B1	0.100 E-01	0.303	0.357	2	0.210	-	0.870
	B3	0.120	0.443	0.733 E-1	-	0.610	2	1.126
48 BARRAS	C1	0.163	0.573	0.210	1	0.177	-	0.960
	C3	0.133	0.517	0.417	3	0.317	1	1.250
	C4	0.157	0.553	0.327	3	0.293	1	1.173

(*) Não é considerado o tempo de leitura dos dados.

5.4 - Verificação dos Resultados Usando Estimação de Estado

Para a verificação dos resultados é aplicado o método de estimação de estados da parte observável dos sistemas considerados no Capítulo IV.

No procedimento inicial para estimar os estado de um subsistema observável, sugerido por Broussolle e Le Roy elimina-se todas as medidas do sistema externo. Para caracterizar a falta de informações sobre as injeções nas barras do sistema externos são consideradas pseudomedidas de injeção com valor nulo em todas as barras deste sistema. As medidas de injeções em barras de fronteira não são consideradas.

Com o método desenvolvido neste trabalho, obtém-se um subsistema expandido desde que as medidas de injeção de fronteira sejam substituídas por pseudomedidas de fluxo. Estas pseudomedidas de fluxo, de potência ativa e reativa nas linhas, são consideradas para as linhas de transmissão correspondentes às arestas associadas pelo algoritmo de observabilidade às medidas de injeção de fronteira. Estas arestas são portanto indicadas pelo próprio método de expansão de subsistemas observáveis. As pseudomedidas utilizadas podem ser obtidas da estimação de estados imediatamente anterior à contingência no sistema de telemedicação que provocou a perda da observabilidade do sistema de potência.

Utilizando-se valores apropriados para as pseudomedidas de fluxo, é possível se reter as dimensões do subsistema expandido e estimar os módulos e ângulos das tensões em suas barras.

5.5 - Considerações Gerais Sobre os Resultados Obtidos

Para cada um dos três sistemas analisados de portes diferentes (ver Apêndice II), observa-se pelos resultados obtidos nas tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 que houve um aumento significativo em ca da subsistema observável o qual contém uma determinada raiz. Nota-se também, que nos casos em que ocorreram aumentos no componente da raiz, devidos tanto ao processamento das medidas externas quanto ao processamento de medidas de injeção, a maior contribuição proveio das medidas externas da injeção, provavelmente pelo fato de que es tas são as medidas inicialmente processadas.

O tempo de processamento deste algoritmo, conforme i lustra a tabela 5.4, é compatível com a sua utilização em tempo real.

C A P Í T U L O VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS6.1 - Conclusões

Este trabalho está voltado ao estudo do problema da observabilidade de sistemas de potência, particularmente nos casos em que deficiências no plano de medição utilizado impedem que os estados do sistema como um todo possam ser estimados, isto é, tornam o sistema não-observável.

Busca-se então expandir um dos componentes observáveis do sistema que contenha uma determinada barra, através do processamento de medidas externas e/ou internas de injeções através de um algoritmo combinatório.

O método proposto para a expansão de um componente observável foi testado em três sistemas de potência, dando como resultado uma ampliação significativa nos componentes observáveis iniciais. Os resultados apresentados foram obtidos utilizando-se nos exemplos testados planos deficientes de medição e obtendo-se a expansão do componente observável através de iterações devidas ao processamento tanto de medidas externas quanto de medidas internas de injeção.

Para a verificação dos resultados, um programa de estimação de estados é utilizado, de acordo com os princípios sugeridos na referência [6] para o tratamento de sistemas não-observáveis.

O tempo de processamento para o aumento de um de terminado componente foi bastante reduzido, significando que o método proposto é compatível com a aplicação em tempo real.

6.2 - Sugestões para Futuros Trabalhos

O método proposto para expansão de componentes observáveis pode ainda ser melhorado e estendido. Para dar continuidade ao trabalho, os seguintes itens são sugeridos:

- 1º) Melhorar o método já existente, conforme o fluxograma da Figura 3.5 permitindo o reprocessamento de medidas externas de injeção sempre que o processamento de medidas internas resultar em aumento do componente da raiz;
- 2º) É possível também melhorar o desempenho do método de tratamento de injeções internas, selecionando a aresta de co-fronteira a ser associada à injeção interna de modo a obter uma contribuição ainda maior, em termos do número de vértices ligados ao componente da raiz;
- 3º) Dar uma atenção maior à análise de observabilidade nos casos em que não exista paridade entre as medidas ativas e reativas. Nestes casos, é necessário se testar separadamente as observabilidades $P - \delta$ e $Q - V$;

49) Estender o método proposto de modo a selecionar as pseudomedidas necessárias para tornar completamente observável um sistema original mente classificado como não-observável pela rotina que testa a observabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - K.A. Clements and B. F. Wollenberg, "An Algorithm for Observability Determination In Power System State Estimation", apresentado no IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, Jul. 1975.
- [2] - J.J. Allemong, G.D. Irisarri and A.M. Sasson, "An Examination of Solvability For State Estimation Algorithms", apresentado no IEEE PES Winter Meeting, New York Fev. 1980.
- [3] - G.R. Krumholz, K.A. Clements and P.W. Davis, "Power System Observability - A Practical Algorithm Using Network Topology", IEEE Trans. On PAS, Vol. PAS-99, NO 7, Jul/Aug. 1980, pp. 1534-1542.
- [4] - V. H. Quintana, A. Simões Costa and A. Mandel, "Power System Topological Observability Using a Direct Graph-Theoretic Approach", IEEE Trans. On PAS, Vol. PAS-101, NO. 3, Mar. 1982, pp. 617-626.
- [5] - K. A. Clements, G.R. Krumholz and P.W. Davis, "Power System State Estimation With Measurement Deficiency - An Algorithm That Determines The Maximal Observable Subnetwork", IEEE Trans. On PAS, Vol. PAS-101, NO. 9, Sep. 1982, pp. 3044-3052.

- [6] - F. Broussole, A. Le Roy. "Estimation D'État et Réseaux Non-Observables", E.D.F. Bulletin de La Direction Des Etudes et Recherches, NO. 4, 1982, pp. 5-9.
- [7] - A. Simões Costa and V. H. Quintana, "A Robust Numerical Technique for Power System State Estimation", IEEE Trans. On PAS, Vol. PAS-100, NO. 2, Fev. 1981, pp. 691-698.
- [8] - Th. Van Cutsem e P.J. Gailly, "A Simple Algorithm For Power System Observability Analysis and Related Functions", IFAC Symposium on Control Applications to Power System Security, Florença, Set. 1983.
- [9] - K. A. Clements, G.R Krumpholz and P.W. Davis, "Power System Estimation With Measurement Deficiency: An Observability/Measurement Placement Algorithm", IEEE Trans. On PAS, Vol. PAS-102, NO. 7, Jul. 1983, pp. 2012-2020.
- [10] - A. J. A. Simões Costa, "Power System State Estimation: Orthogonal Methods For Estimation and Bad Data Processing, and Techniques/For Topological Observability", Tese de Ph.D., University of Waterloo, Waterloo, Ontário, Canadá (1981).
- [11] - C.T. Chen, "Introduction to Linear System Theory", Holt, Rinerhart and Winston, Inc.

A P Ê N D I C E I

ILUSTRAÇÃO DA EXPANSÃO DE UM COMPONENTE OBSERVÁVEL

Neste Apêndice mostra-se a ampliação de um componente da raiz por meio de grafos. Um processo iterativo busca no componente da raiz e em componentes adjacentes vértices de fronteira contendo medidas de injeção. As iterações prosseguem até que não se observe mais nenhum acréscimo no número de vértices do componente da raiz.

Dois exemplos foram utilizados para se visualizar o processo iterativo.

Primeiramente considera-se o sistema de 14 barras com um plano de medição deficiente apresentado na Figura A-1.1. Obteve-se neste exemplo, pelo método pesquisado após duas iterações, um aumento significativo do número de barras no componente da raiz através do processamento de medidas externas de injeção.

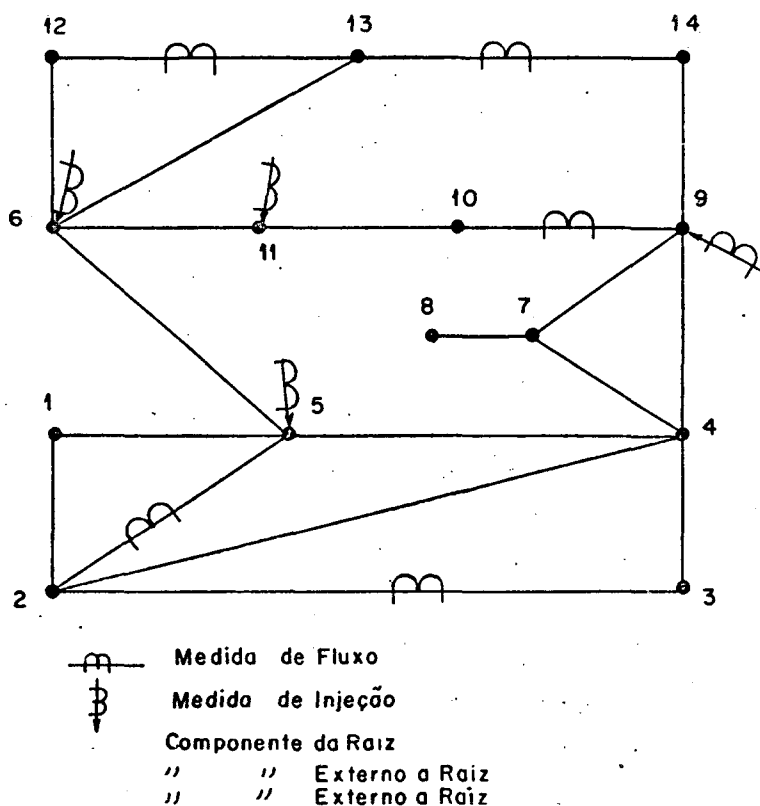


FIGURA A-1.1 - Sistema de 14 Barras contendo Plano de Medição.

A Figura A-1.2 mostra a máxima floresta obtida, após a aplicação do algoritmo que testa a observabilidade descrito no Capítulo II. Esta floresta é formada de componentes sendo a raiz escolhida como o vértice 13. O componente da raiz é formado pelos vértices 12, 13 e 14.

Os outros dois componentes vizinhos ao subsistema que contém a raiz são formados por arestas associadas às medidas de injeção ou por arestas associadas a medidas de fluxo.

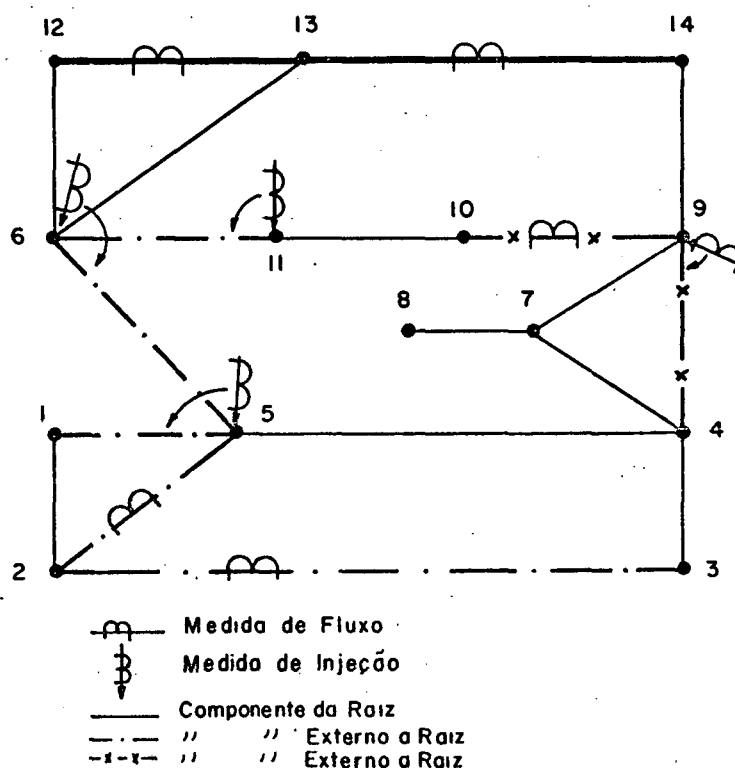


FIGURA A-1.2 - Máxima Floresta obtida formada por 3 Componentes.

Na primeira iteração os vértices externos 6 e 9 que apresentam medidas de injeção, são re-associados às arestas de co-fronteiras 6-12 e 9-14 respectivamente, de modo a ampliar o componente que se tem interesse. Resultam desta re-associação a redefinição dos componentes apresentados na Figura A-1.3.

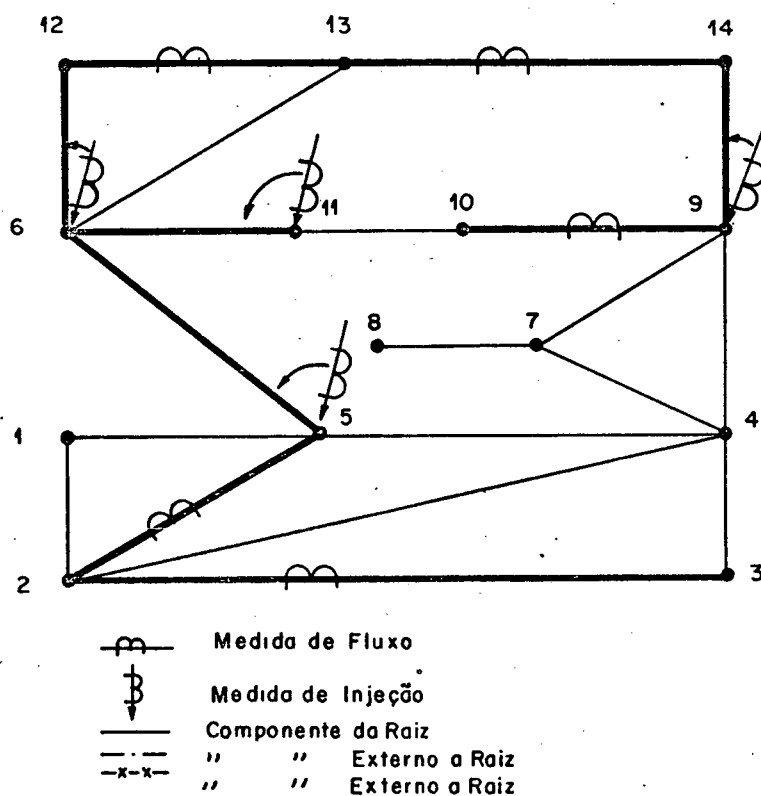


FIGURA A-1.4 - O Componente Ampliado contendo a Raiz
Obtido pelo Método Desenvolvido.

A seguir, outro exemplo mostra o processamento das medidas externas e internas de injeção.

A máxima floresta obtida é formada por três componentes, representados, na Figura A-1.5.

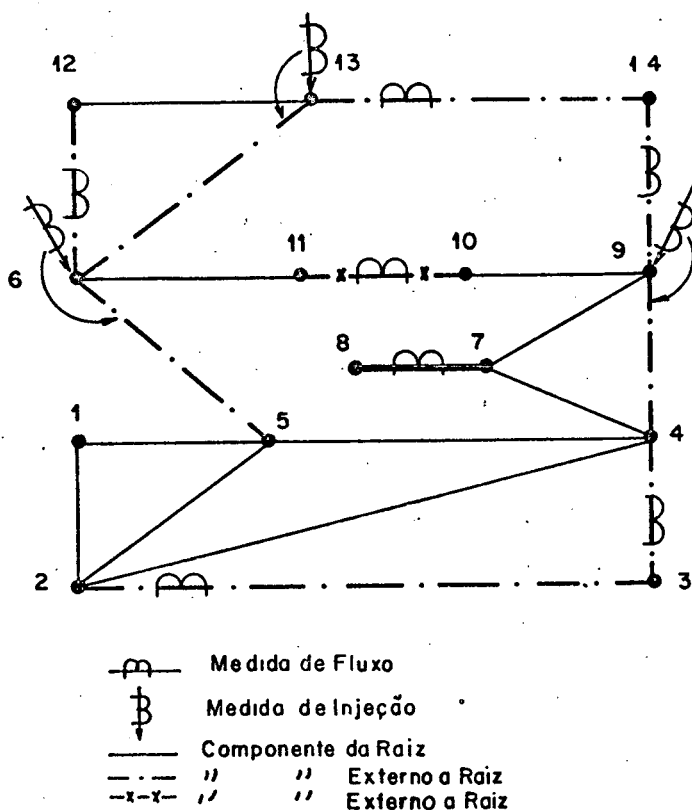


FIGURA A-1.5 - Máxima Floresta obtida Resultante de um Plano de Medição Deficiente.

A raiz escolhida (o vértice 8) está contida no componente que contém os vértices 7 e 8, o qual se deseja ampliar.

Ao se processar a medida externa de injeção no vértice 9, esta é re-associada a uma aresta de co-fronteira 7-9, ampliando assim o componente da raiz, que passa a contar com os vértices 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13 e 14. Ver Figura A-1.6.

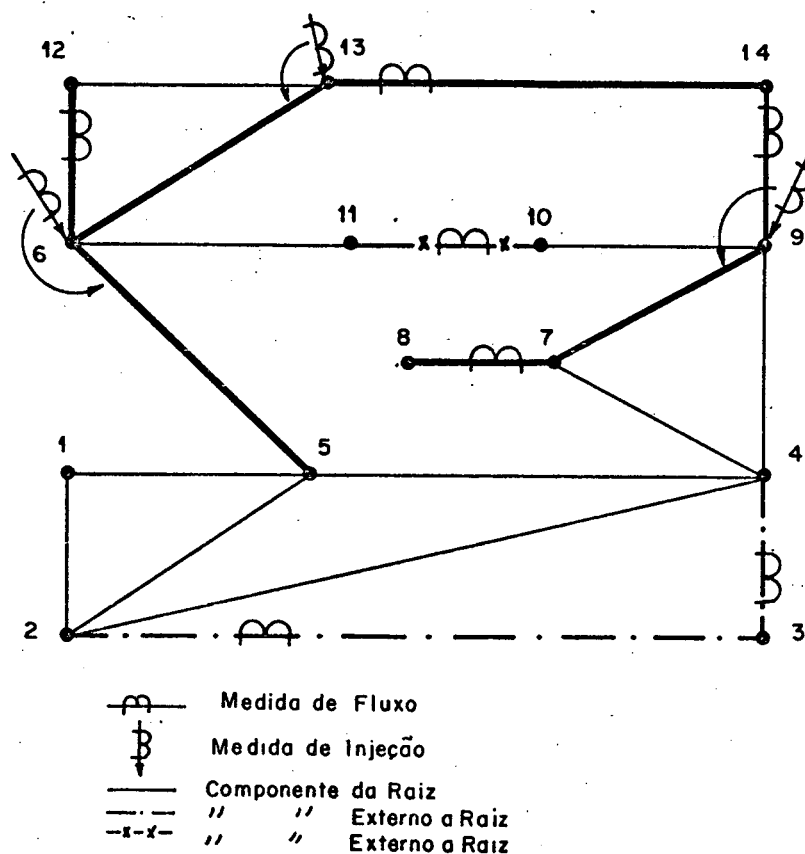


FIGURA A-1.6 - Expansão do Componente da Raiz pelo Processamento da Medida Externa de Injeção na Barra 9.

Em seguida, observa-se no componente da raiz a existência de uma medida interna de injeção no vértice de fronteira 6. Esta medida é re-associada a aresta de co-fronteira 6-11, para ampliar o componente de interesse o qual conterá finalmente os vértices 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14. O subsistema observável expandido é mostrado na Figura A-1.7.

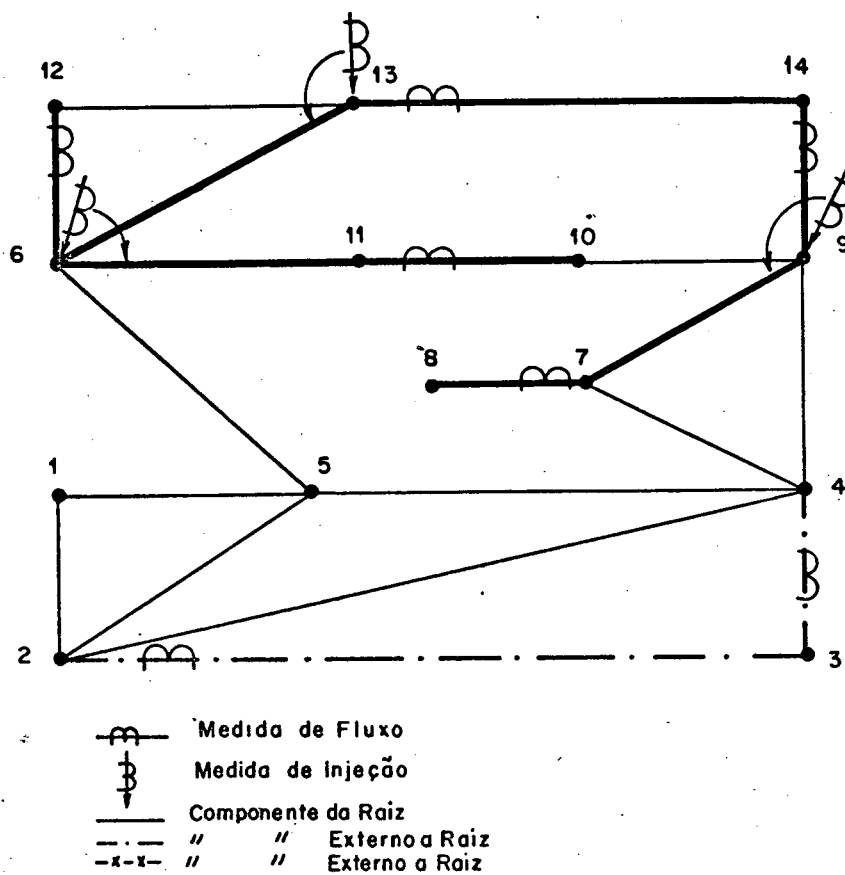


FIGURA A-1.7 - Aumento do Componente da Raiz devido o Processamento da Medida Interna de Injeção (6).

TABELA 2.1 - Plano de Medição Utilizado no Sistema de 14 Barras.

SISTEMA	CASO	MEDIDAS DE INJEÇÕES AOS PARES REALIZADOS NAS BARRAS	MEDIDA DE TENSÃO NA BARRA	MEDIDAS DE FLUXO AOS PARES NAS LINHAS
14 BARRAS	A1	5, 6, 9, 11	13	1, 3, 5, 16, 19, 20
	A2	4,9	2	1, 3, 6, 14, 18, 19, 20
	A3	2, 5, 6, 9, 11	1	3, 5, 16, 19, 20
	A4	1, 5, 8, 12, 13	1	5, 6, 8, 13, 17, 18
	A5	1, 5, 8, 10, 12, 13	1	5, 6, 8, 13, 17, 18, 20
	A6	6, 9, 13	8	1, 5, 6, 8, 10, 14, 17

2.2 - Sistema de Potência de 30 Barras

O sistema de trinta barras e quarenta e uma linhas é mostrado na Figura A-2.2.

Os planos de medição para os diversos casos testados são apresentados na Tabela 2.2.

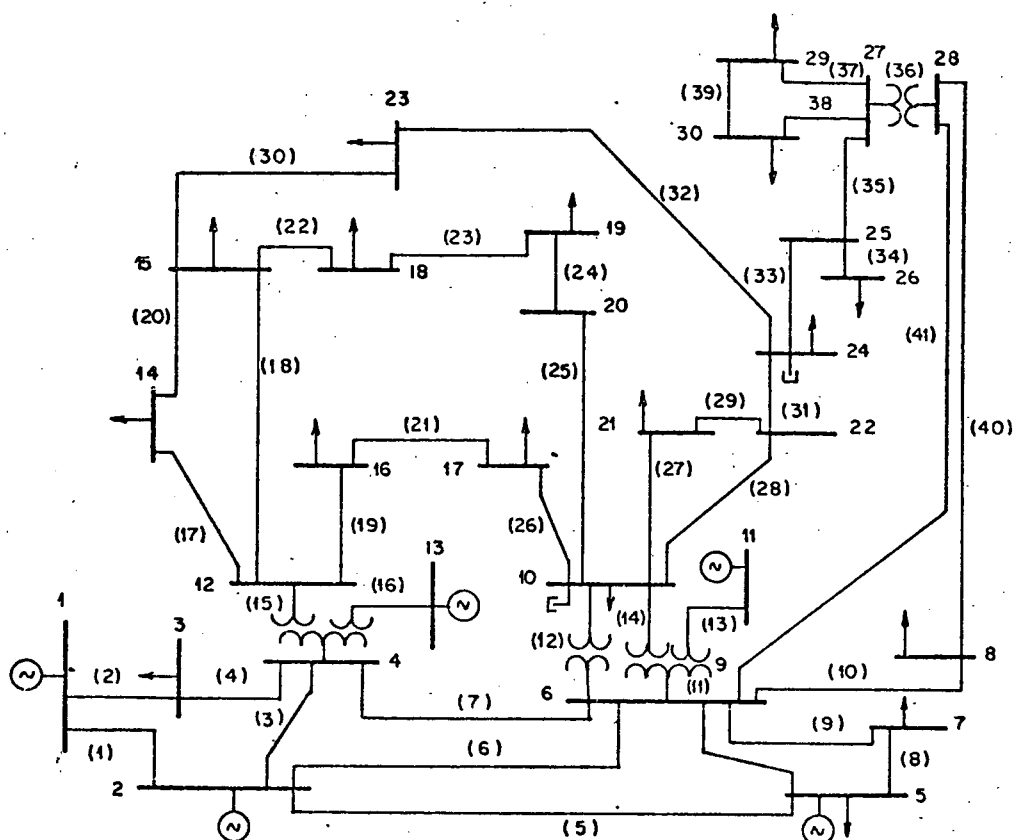


FIGURA A-2.2 - Diagrama Unifilar para o Sistema de 30 Barras.

TABELA 2.2 - Plano de Medição utilizado no Sistema de 30 Barras.

SISTEMA	CASO	MEDIDAS DE INJEÇÕES AOS PARES REALIZADOS NAS BARRAS	MEDIDA DE TENSÃO NA BARRA	MEDIDAS DE FLUXO AOS PARES NAS LINHAS
30 BARRAS	B1	1, 2, 3, 5, 8, 11, 12, 14, 22, 27, 30	1	3, 11, 14, 15, 16, 22, 30, 39, 41
	B2	1, 2, 3, 5, 8, 11, 12, 15, 16, 20, 27	1	3, 11, 12, 17, 20, 30, 39, 41
	B3	1, 2, 3, 6, 7, 14, 22, 23, 27	1	3, 6, 13, 14, 15, 16, 29, 30, 33, 35, 37, 39
	B4	1, 2, 3, 6, 7, 14, 22, 27	1	3, 6, 13, 14, 15, 16, 20, 29

2.3 - Sistema de Potência de 48 Barras

O diagrama unifilar do sistema de quarenta e oito barras e sessenta e cinco linhas é mostrado na Figura A-2.3. Este sistema faz parte do sistema ELETROSUL - CELESC. Os planos de medição usados nos casos-teste são indicados na Tabela 2.3.

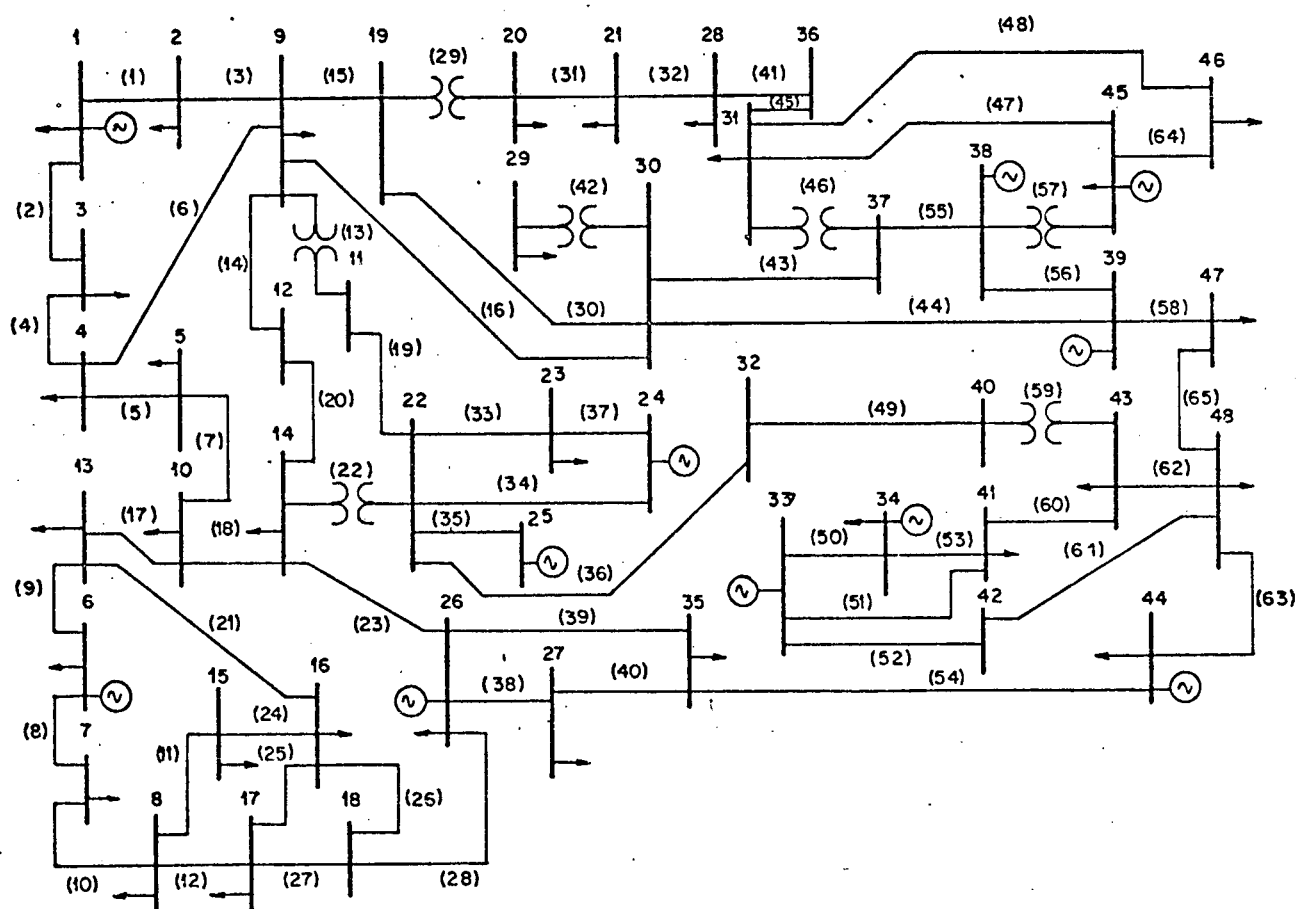


FIGURA A-2.3 - Diagrama Unifilar para o Sistema de 48 Barras.

TABELA 2.2 - Plano de Medição utilizado no Sistema de 48 Barras.

SISTEMA	CASO	MEDIDAS DE INJEÇÕES AOS PARES REALIZADAS NAS BARRAS	MEDIDA DE TENSÃO NA BARRA	MEDIDAS DE FLUXO AOS PARES NAS LINHAS
48 BARRAS	C1	1, 2, 3, 5, 8, 11, 12, 14, 22, 27, 30	26	3, 11, 14, 15, 16, 22, 30, 39, 41
	C2	1, 2, 3, 5, 8, 11, 12, 14, 22, 27, 30	2	3, 11, 14, 15, 16, 22, 39, 41
	C3	1, 2, 3, 5, 8, 12, 14, 22, 27, 40, 48	40	3, 11, 15, 22, 39, 41, 59
	C4	1, 2, 3, 5, 8, 12, 14, 22, 27, 40, 48	35	3, 11, 15, 22, 39, 41, 59